ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

NUEVAS TECNOLOGIAS

BIBLIOTECA DE ELECTRONICA/INFORMATICA




NUEVAS
TECNOLOGIAS
BIBLIOTECA DE ELECTRONICA/INFORMATICA

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA



Esta obra es una nueva edición aumentada y corregida de la obra originalmente publicada por Marcombo, S.A. de Boixareu editores, con el título de «Electrónica aplicada»

El contenido de la presente obra ha sido realizado por Marcombo, S.A. de Boixareu editores, bajo la dirección técnica de José Mompin Poblet, director de la revista «Mundo Electrónico»

ISBN 84-7634-485-6 (Obra completa)
ISBN 84-7634-489-9 (Vol. 3)
D.L.: B. 2317-1986

Impreso y encuadernado por
Printer industria gráfica sa Provenza, 388 08025 Barcelona
Sant Vicenç dels Horts 1986

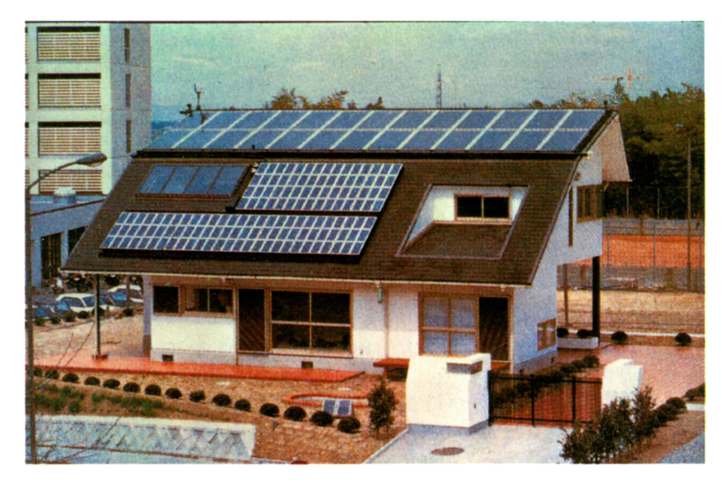
Printed in Spain

Energía solar fotovoltaica

INTRODUCCION

El impacto que produce la posibilidad de utilizar la energía solar en forma controlada y para nuestros propios fines, es un hecho que justifica la aparición de este tema. En este campo, son las aplicaciones térmicas de la energía solar (calentamiento de fluidos y calefacción de locales mediante colectores térmicos y concentradores, o producción de electricidad con centrales termosolares) las que resultan más familiares para los no profesionales del tema. La producción de electricidad a partir de la radiación solar mediante células solares y paneles fotovoltaicos es una aplicación menos difundida.

La energía eléctrica no está presente en la naturaleza como fuente de energía primaria y, en consecuencia, sólo podemos disponer de ella obteniéndola por transformación de alguna otra forma de energía. Las primeras pilas desarrolla-



En algunas viviendas se combinan colectores térmicos (parte superior del tejado) con módulos fotovoltaicos para lograr una mayor autonomía energética y conseguir agua caliente y energía eléctrica.

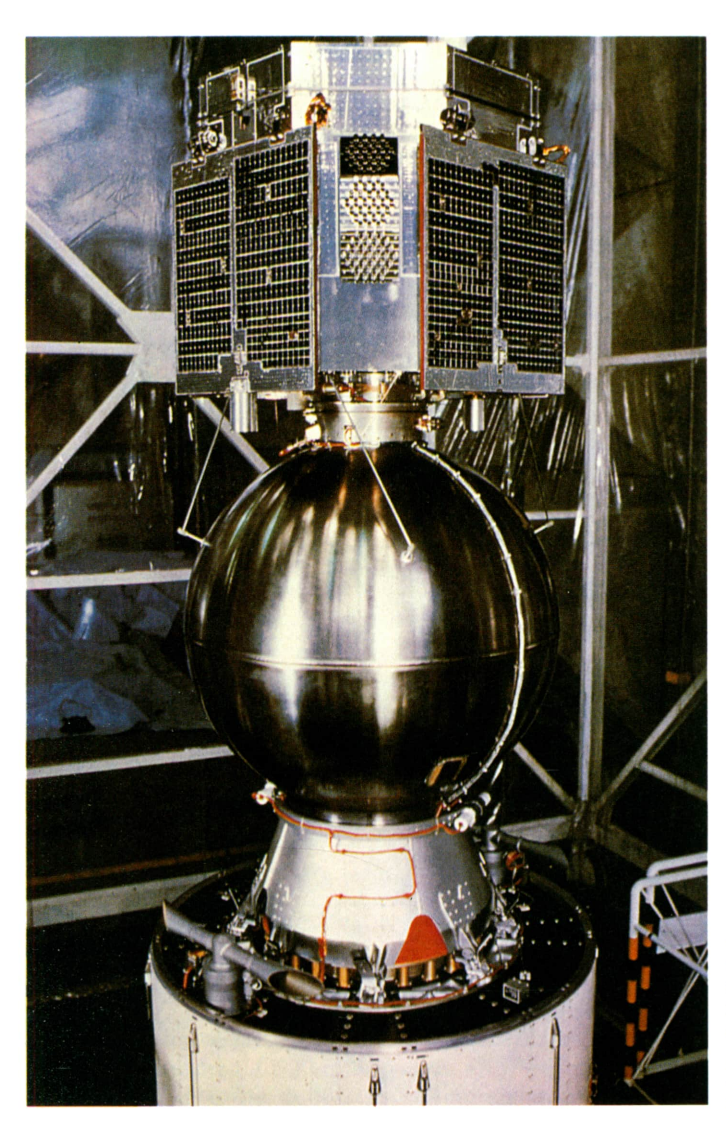
das por el hombre generaban energía eléctrica a partir de la química de determinados compuestos. Algún tiempo después, la energía mecánica fue la principal fuente de electricidad gracias a la utilización de dinamos y alternadores. En último término, la transformación controlada de la energía térmica en mecánica ha permitido llegar a los procedimientos de producción de electricidad que actualmente se explotan: las centrales eléctricas, en las que la



El avión Challenger cruzó el Canal de la Mancha en un vuelo experimental. Las partes azuladas en las alas son los paneles de células solares. (Cortesía: DuPont).

energía térmica liberada por una fuente de energía primaria (madera, carbón, petróleo, gas, combustible nuclear, etc.) se transforma en electricidad a través de un proceso sumamente elaborado que exige el uso de turbinas y alternadores, los cuales cubren la etapa final de conversión de energía mecánica en eléctrica. Bajo un punto de vista conceptual, las centrales hidroeléctricas reposan en otros mecanismos de operación pero, en última instancia, son productoras de electricidad gracias a la energía mecánica del agua acumulada.

El hombre ha aprendido recientemente a transformar la energía solar en eléctrica mediante diferentes procedimientos. Algunos de ellos, los llamados *heliotérmicos* o *fototérmicos*, operan sobre principios semejantes a los de las centrales térmicas y nucleares convencionales y no serán



La mayoría de los satélites artificiales incorporan las células rectangulares como un recubrimiento exterior, como se ve en la parte superior de esta fotografía. (Cortesía: Sharp).

tratados en este trabajo por constituir aplicaciones esencialmente térmicas de la energía solar. Otros, sin embargo, los denominados *fotovoltaicos*, han supuesto una importante simplificación respecto a los procesos energéticos conven-

cionales: convertir una energía primaria, la solar, en electricidad de un modo *directo*, es decir, sin transformaciones intermedias en otras formas de energía. Las *células solares* o *células fotovoltaicas* son dispositivos capaces de

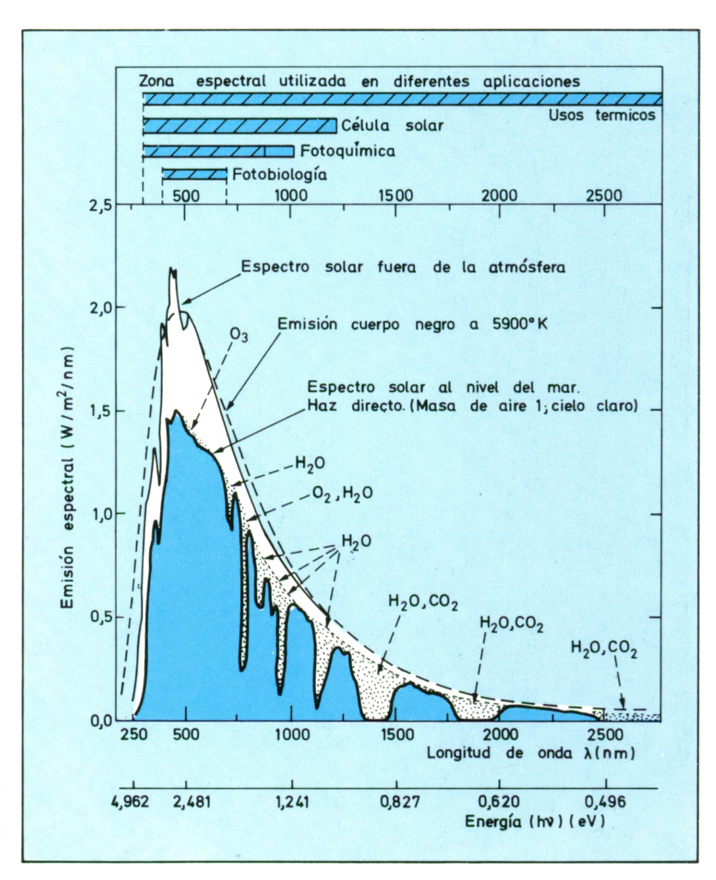


Figura 4. Espectro de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre y en la superficie del planeta. Las zonas punteadas indican la absorción debida a los componentes atmosféricos. Se ha representado también la emisión de un cuerpo negro a 5.900°K temperatura equivalente a la de la emisión solar. En la parte superior se señalan los márgenes espectrales útiles en diferentes aplicaciones solares.

transformar la radiación solar en electricidad; son dispositivos estáticos, carentes de partes móviles y en absoluto semejantes a los generadores convencionales.

Este capítulo está dedicado a las células solares, a describir su fundamento, la tecnología de su fabricación, las

formas en que se utilizan a través de paneles fotovoltaicos y sus principales aplicaciones actuales, así como algunas consideraciones para su aplicación futura. Todo ello precedido por una breve información sobre las características de la radiación solar, de modo que, como deseamos, sea suficiente para lograr una comprensión y un conocimiento iniciales del tema.

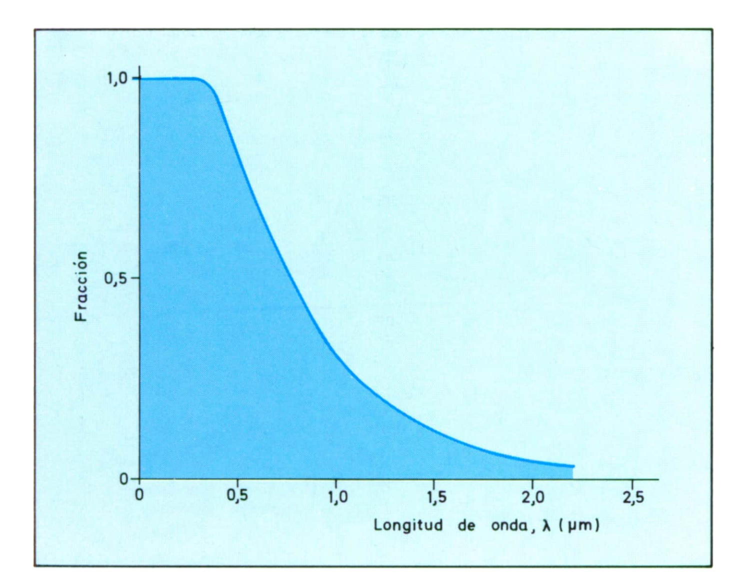


Figura 5. Fracción de energía solar contenida en la parte del espectro por encima de la longitud de onda, λ. Distribución de la energía solar global recibida en función del intervalo de longitudes de onda considerado.

EL SOL Y LA RADIACION SOLAR

El Sol es la estrella de nuestro sistema planetario alrededor del cual la Tierra gira, desde el punto de vista astronómico pertence al tipo de estrellas llamadas *Enanas Amarillas*, tiene una edad de unos 4.500 millones de años y una existencia previsible de unos 5.000 millones de años antes de transformarse en una *Gigante Roja*, fase en la que se producirá la desaparición de la vida en nuestro planeta. El diámetro del Sol es aproximadamente 1,39 millones de km, y se puede considerar compuesto por diferentes capas concéntricas con temperaturas decrecientes hacia el exte-

rior. La más externa de las capas opacas se denomina *fotosfera* y está compuesta por gases fuertemente ionizados a una temperatura aproximada de 6.000°K, valor que caracteriza la calidad de la energía que el Sol irradia en todas direcciones. Las restantes capas exteriores de la estrella son relativamente transparentes a la radiación.

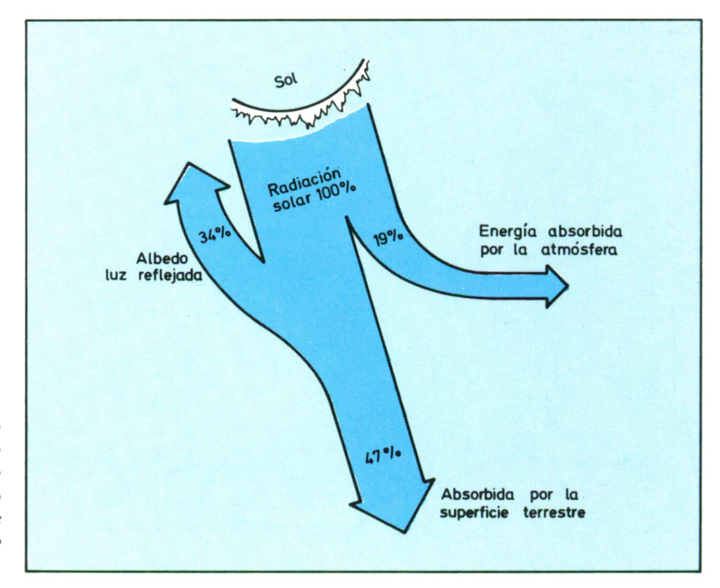


Figura 6. Distribución global de la radiación incidente. La fracción considerada como albedo o reflejada lo es después de incidir en la superficie terrestre.

La energía que de forma continua irradia el Sol está compuesta por ondas electromagnéticas de longitudes de onda en las zonas ultravioleta, visible e infrarroja del espectro, tal y como se muestra en la figura 4. El conocimiento del espectro de emisión del Sol es de suma importancia para un desarrollo óptimo de las aplicaciones solares. Se puede observar que el máximo de emisión corresponde a una longitud de onda de $\simeq 0{,}5\ \mu$m, es decir, el color verde. Por otro lado, los diferentes componentes de la atmósfera terrestre absorben parte de la radiación solar, como se ha indicado en la figura.

Para las aplicaciones solares, especialmente las fotovoltaicas, es interesante conocer qué cantidades de energía hay

contenidas en el espectro solar por encima o por debajo de una determinada longitud de onda. Esta información se refleja en la figura 5. Se puede comprobar que aproximadamente el 80 % de la energía que nos envía el Sol corresponde a longitudes de onda de la radiación menores que $\simeq 1{,}5$ μm. Las longitudes de onda se pueden medir en cualquiera de las unidades siguientes: 1 nm $= 10^{-9}$m; 1 Å $= 10^{-10}$ m; 1 μm $= 10^{-6}$m. Las energías de los fotones se miden convencionalmente en eV (electrón-voltio). Entre las longitudes de onda, λ, y la energía de los fotones existe la relación:

$$hv\ (eV) = \frac{1{,}2406}{\lambda\,(\mu m)}$$

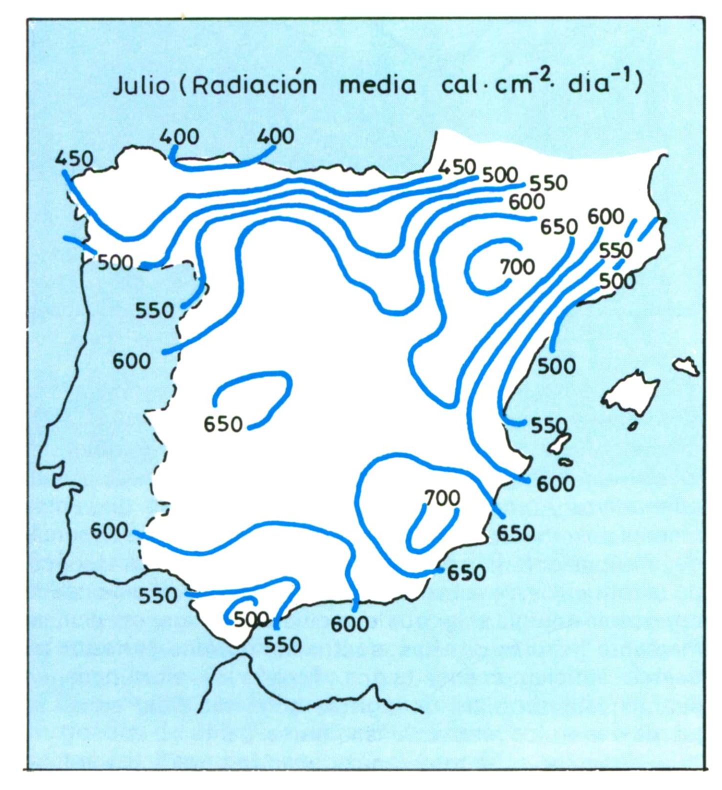


Figura 7. Mapa de la insolación media durante el mes de Julio considerado como el de máxima insolación.

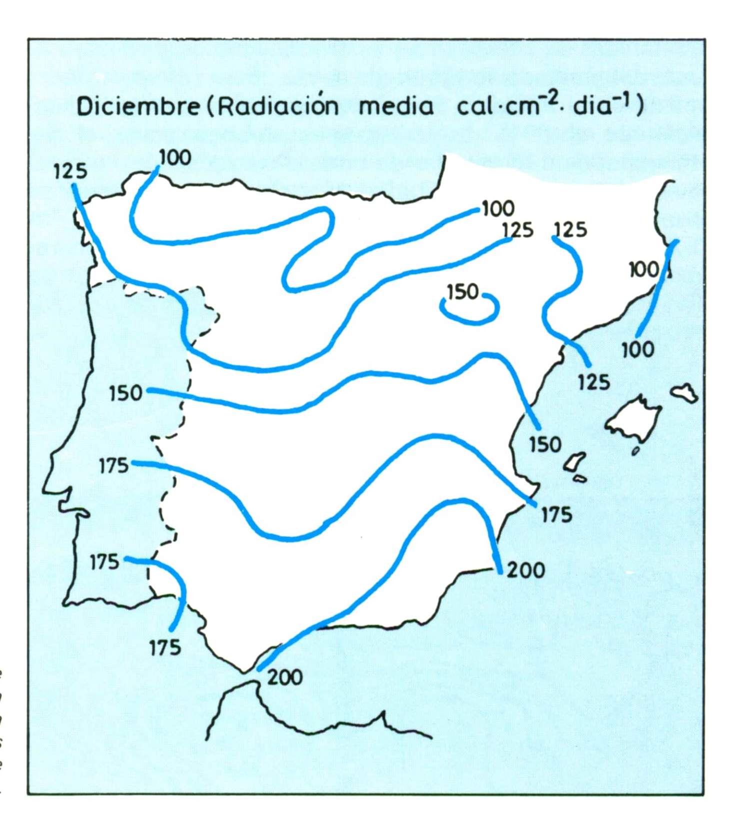
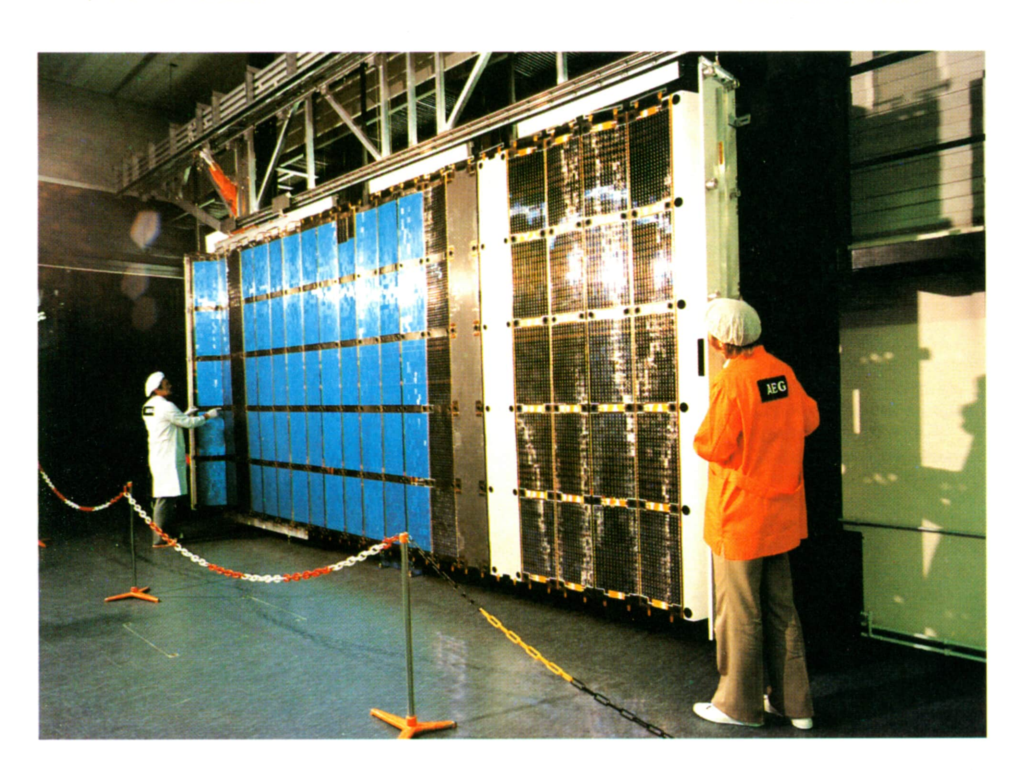


Figura 8. Distribución de la radiación solar media en una época de mínima insolación como es durante el mes de Diciembre.

Toda esta considerable cantidad de energía no alcanza la superficie de la Tierra, sino que se distribuye por la acción de diferentes mecanismos que se han dibujado esquemáticamente en la figura 6. Los valores indicados son sólo orientativos y promedios, ya que la acción de los diferentes medios absorbentes y difusores es una variable que depende de la nubosidad, lugar geográfico, etc. Como consecuencia de la influencia de estos factores, resulta que sólo se puede conocer la energía solar que se recibe en un lugar del planeta mediante lecturas directas efectuadas durante períodos de tiempo suficientemente largos. España es afortunada en cuanto a la cantidad de energía solar recibida, como se puede ver en los mapas de las figuras 7 y 8.

La radiación solar total incidente en la superficie terrestre

tiene una componente *directa* (procedente en línea recta del Sol) y otra *difusa* (procedente de todo el hemisferio zenital y difundida por la atmósfera). El conocimiento de la contribución relativa de cada una de esas componentes es importante en la práctica ya que, por ejemplo, ciertos convertidores solares, llamados de *concentración dinámica*, sólo utilizan la componente directa.



Paneles solares, para el L-Sat, de más de 26 metros. Este generador solar posee 43.000 células que están interconectadas en el extremo de finas láminas comprimidas en solamente 60 metros cuadrados. El conjunto proporciona una potencia eléctrica de 5 KWp que resulta suficiente para la estación de enlace vía satélite para recibir y transmitir programas de TV, radio, datos y teléfono. (Cortesía: AEG).

FUNDAMENTOS Y CARACTERISTICAS DE LAS CELULAS SOLARES

Efecto fotovoltaico

Bajo ciertas condiciones, cuando una radiación electromagnética de energía suficiente incide sobre determinados materiales, parte de la energía es absorbida generándose en

el interior del material, pares de cargas positivas y negativas. Si la radiación electromagnética es la solar y el material considerado un semiconductor tal como el Si, los *pares de carga* son *electrones* (e^-) y *huecos* (h^+) que una vez producidos se mueven aleatoriamente en el volumen del sólido. Si no hay ningún condicionante externo ni interno dicho movimiento aleatorio conduce a que, finalmente, las cargas de signos opuestos se recombinen produciéndose su mutua neutralización. Por el contrario, si mediante algún procedimiento se ha creado en el interior del material un campo eléctrico local permanente, las cargas positivas y

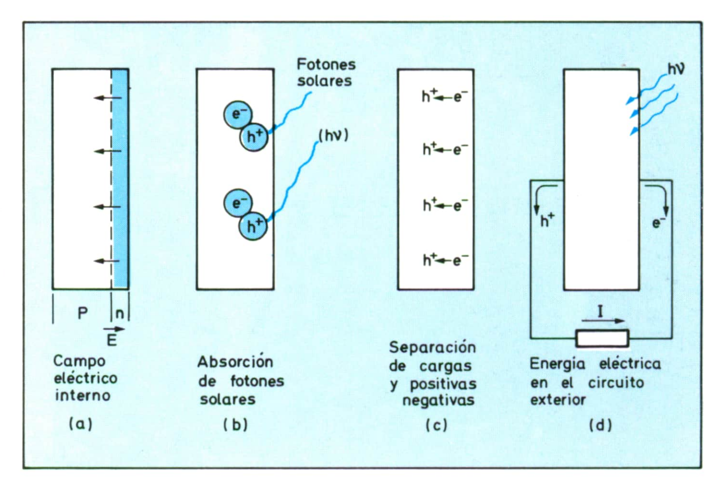


Figura 10. Descripción gráfica y cualitativa del efecto de la radiación solar en el volúmen de un semiconductor y del mecanismo de operación de una célula solar. Se intenta destacar la importancia del campo eléctrico interno que en la práctica se crea, por ejemplo, con una unión p-n.

negativas serán separadas por él. Esta separación conduce al establecimiento de una diferencia de potencial entre dos zonas del material que, si son conectadas entre sí mediante un circuito externo al tiempo que la radiación electromagnética incide sobre el material, darán origen a una corriente eléctrica que recorrerá el circuito externo. El fenómeno descrito se llama *efecto fotovoltaico* y fue descubierto por Becquerel en 1839. En el año 1877 se confirmó que dicho fenómeno también se producía en la interfase entre dos sólidos determinados. El efecto fotovoltaico es el fundamento en el que se basan las células solares, razón por la cual también se suelen llamar células fotovoltaicas. En la figura 10 se esquematiza el mecanismo descrito.

El campo eléctrico interno local se crea siempre que se ponen en contacto un semiconductor tipo «*n*» con otro tipo «*p*», es decir, allí donde existe una *unión p-n*. En la práctica dicha unión se logra por muy diferentes procedimientos, los más convencionales de los cuales son las técnicas de difusión de impurezas (producción de diodos).

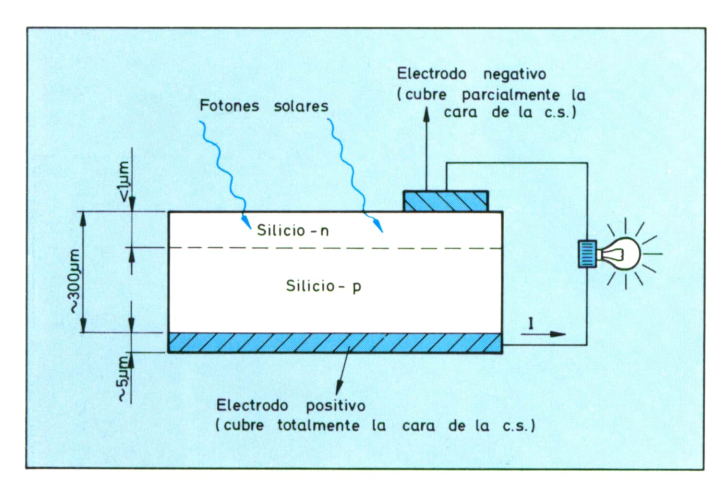
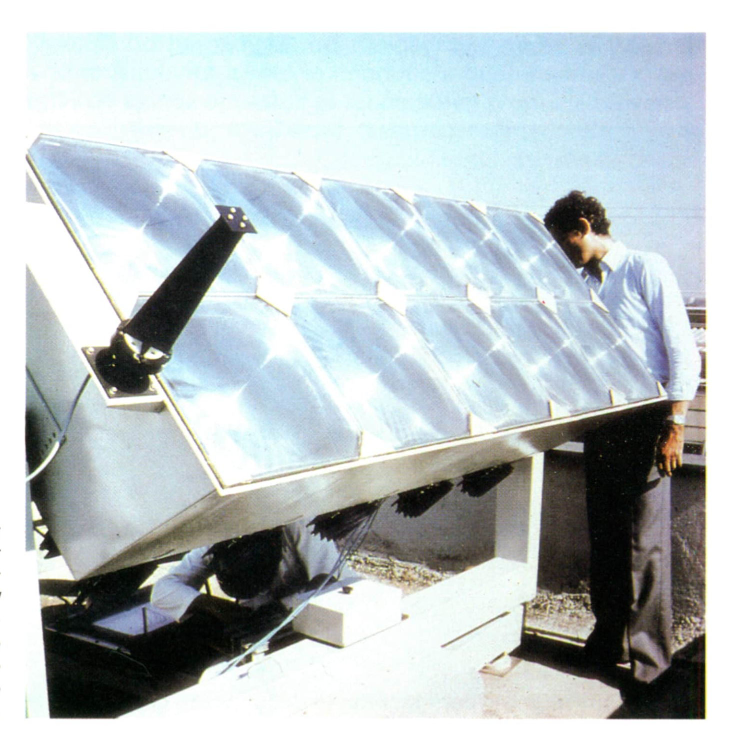


Figura 11. Funcionamiento esquemático de una célula solar bajo la acción de la radiación solar. Entre los extremos de la misma se aprovecha la energía transformada.

La célula solar

En lo que sigue y para facilitar la descripción de una célula solar, se centrará el tema en las de Si monocristalino, aunque lo que se expone es válido para todos los tipos. Partiendo de una *oblea* de Si (un disco muy delgado) se produce una célula solar una vez se ha creado el campo eléctrico interno ya citado, y después de preparar los contactos eléctricos adecuados. Para aumentar la eficiencia de los fotones solares que penetran en el semiconductor, el campo eléctrico debe ser superficial, de tal forma que la célula es en este aspecto semejante a un diodo en el que la unión rectificadora se ha dispuesto muy próxima a la cara que se enfrenta al Sol. Los contactos eléctricos que se hacen en ambas caras de la oblea son de geometría y características especiales. La cara que no recibe la radiación se recubre en forma continua y total con uno o varios depósitos metálicos,

por el contrario la cara expuesta a los rayos solares está recubierta por un electrodo metálico en forma de red compleja (figura 11), ya que dicho electrodo ha de recoger



Tipos de concentradores estáticos para aprovechar la radiación solar: desarrollados por el profesor A. Luque de la Escuela Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Madrid.

eficientemente los portadores de carga eléctrica generados en el interior de la oblea y, al mismo tiempo, no puede ser tan continuo como para impedir que los rayos solares alcancen el material semiconductor.

La descripción cualitativa final de una célula es tal y como se ve en la figura 13.

En resumen, para que una célula solar expuesta al Sol produzca energía eléctrica debe reunir, al menos, tres características fundamentales:

a) Ser capaz de absorber una fracción importante de la radiación solar que recibe para que la generación de pares electrón-hueco sea eficiente.

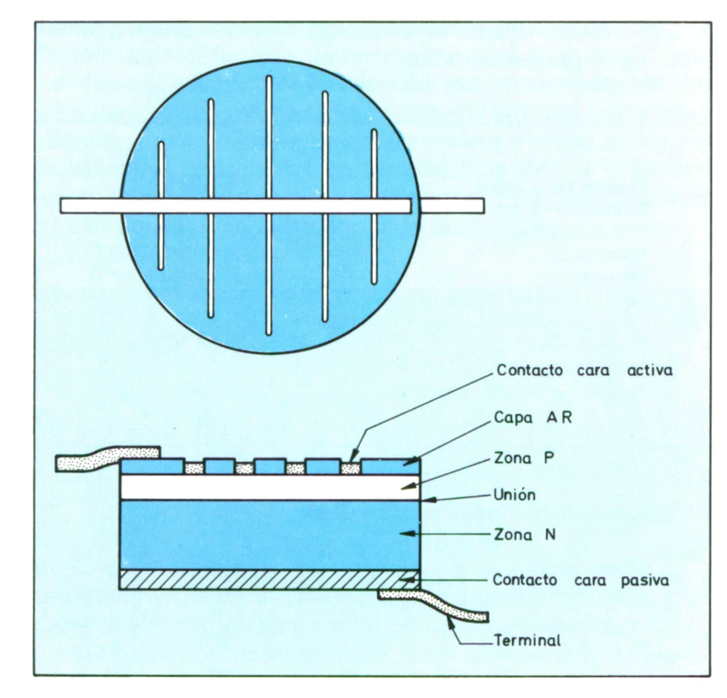


Figura 13. Representación aproximada de la estructura exterior de una célula solar convencional de Si monocristalino. En la parte superior se representa una posible geometría del electrodo preparado en la cara donde incide la radiación solar. En la inferior se señalan la estructura y componentes.

b) Tener un campo eléctrico interno que separe las dos cargas de cada par impidiendo su posterior recombinación.

c) Finalmente, las cargas separadas deben ser capaces de viajar a través de la oblea hasta los electrodos superficiales desde donde pasan al circuito exterior.

Bajo un punto de vista histórico las primeras aplicaciones del efecto fotovoltaico dieron origen a células con rendimientos bajos ($\simeq$ 4 %) debido a que los materiales utilizados no eran de la adecuada calidad. Fue en el año 1954 cuando gracias a la incorporación del Si monocristalino como material fotovoltaico, se obtienen células reproducibles con rendimientos del 6 %. Dichas células, basadas en las propiedades fotovoltaicas de las uniones p-n, fueron comercializadas en 1955 y todavía son las de mayor utilización real y práctica.

Desde 1954 hasta hoy se han ensayado y desarrollado una gran variedad de nuevos tipos, modelos y conceptos de

células solares. Las de Si se fabrican de diferentes geometrías según las necesidades.

Espesor de la oblea:	$\simeq$ 300 μm
Espesor de la capa n:	$\simeq < 1{,}0$ μm
Profundidad de la unión p-n:	$\simeq$ 0,2 μm
Material n:	Si dopado con P
Material p:	Si dopado con B
Resistividad del material p:	$0{,}1 \div 10\ \Omega$ cm
Intensidad del campo eléctrico en la unión p-n:	$\simeq 5 \times 10^4\ V{\cdot}m^{-1}$
Materiales que componen los electrodos:	Al, Ti, Pd, Ag
Espesor de los electrodos:	$\simeq$ 5 μm

Características estructurales de las células solares de silicio monocristalino.

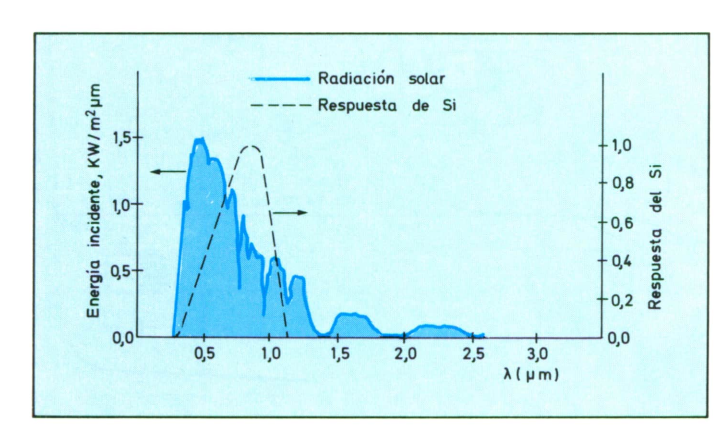
Respuesta espectral de la célula de Si

La energía necesaria para crear un par electrón-hueco en Si es $\simeq$ 1,12 eV (anchura de la *banda prohibida* o «bandgap» del semiconductor) y sólo los fotones solares de energía igual o superior a ese valor (equivalente a una longitud de onda de 1,1 μm) son absorbidos por el material. El Si es transparente a radiaciones de longitudes de onda mayores



Prototipo de concentrador estático con células bifaciales desarrollado por el profesor Luque. (Cortesía: Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid).

que la citada, lo cual implica que una fracción importante de la radiación solar que recibimos ($\simeq$40 %) no es útil para producir el efecto fotovoltaico en ese semiconductor. Por otra parte, si los fotones son de elevada energía (correspondientes, por ejemplo, a radiación violeta y ultravioleta) son fuertemente absorbidos en la superficie del Si y generan pares de carga que se recombinan antes de ser separados por el campo eléctrico existente en la unión p-n.



Energía que proporciona la célula de Si en función de la longitud de onda de la radiación incidente. Esta curva es denominada respuesta espectral de la célula que en la figura se compara con el espectro de la radiación solar.

De acuerdo con estas consideraciones, se comprueba que la respuesta óptica de la célula solar de Si (ver figura) se extiende desde longitudes de onda de $\simeq$0,4 a 1,1 μm, con

Material:	Si monocristalino
Diámetro:	$\simeq$10 cm
Espesor:	$\simeq$300-400 μm
Con insolación de $\simeq$ 1 kW/m^2 (AM1) la C.S. genera	
Corriente en cortocircuito (Isc):	$\simeq$ 2,2 A
Tensión en circuito abierto (Voc):	$\simeq$ 0,5 V
Corriente en el punto de máxima potencia (Im):	$\simeq$ 2,0 A
Tensión en el punto de máxima potencia (Vm):	$\simeq$ 0,48 V
Potencia máxima (Wm):	$\simeq$ 1 W
Rendimientos actuales (η):	$\simeq$ 10-14 %

Características y prestaciones generales de las actuales células solares de silicio monocristalino.

un máximo alrededor de 0,8-0,9 μm, aunque la posición de este pico es función de la profundidad de la unión. De hecho, las células solares que se fabrican para uso interior, en lugares iluminados por lámparas incandescentes, tienen la unión más profunda que las células convencionales para aplicaciones solares.

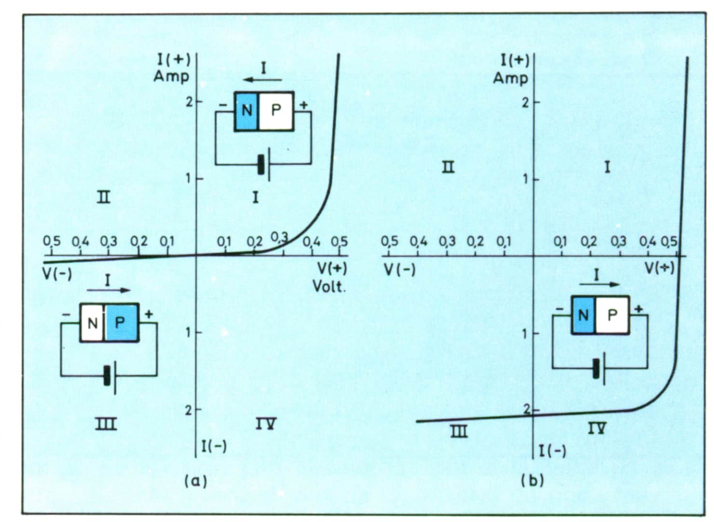


Figura 16. Curvas características de un diodo en oscuridad y bajo iluminación. Se señalan los procesos y mecanismos que operan en cada uno de los cuadrantes. El diodo opera como célula solar en el cuadrante IV.

Características eléctricas de la célula solar de Si

El comportamiento eléctrico de la célula solar se describe adecuadamente mediante características tensión-corriente (V-I). La característica V-I de una célula solar en oscuridad es la típica de un diodo (n-p en lo que sigue) tal y como se puede ver en la figura 16). El comportamiento en polarización positiva es el reflejado por el cuadrante I de la figura. La polarización negativa da origen a una corriente baja de fuga que va desde la cara *n* a la *p* por el interior de la oblea (cuadrante III). Al iluminar la célula bajo las condiciones de polarización citadas la curva característica se desplaza tal y como se ve en la figura 16*b*. En estas circunstancias sólo se obtiene corriente nula si se polariza la célula con una tensión positiva Voc, lo cual significa que, bajo iluminación, el

contacto *p* se ha hecho positivo y en el *n* negativo, y que entre ambos existe una diferencia de potencia Voc, denominada *potencial en circuito abierto.*

Cuando la tensión de polarización externa es cero la corriente adquiere el valor Isc (*corriente en cortocircuito*) debida exclusivamente a la iluminación. Por tanto, en el cuadrante IV la célula solar bajo radiación genera una energía eléctrica, y de aquí que esta zona se considere exclusivamente la característica V-I de la célula solar.

a) *Material de fabricación*
1. Monocristalino (Si monocristalino) 2. Policristalino (Cu_2 S/CdS, película delgada) 3. Amorfo (Si amorfo)
b) *Tipo de unión*
1. Homounión (unión p-n en Si) 2. Heterounión (unión p-n en Cu_2 S/CdS) 3. Metal-semiconductor (barrera Schottky) 4. Metal-aislante-semiconductor (estructura MIS) 5. Semiconductor-aislante-semiconductor (estructura SIS) 6. Electrólito-semiconductor (células de unión líquida)

Diferentes tipos de células solares en función de los materiales y tipos de unión.

Rendimiento del proceso fotovoltaico

El rendimiento de operación de una célula solar se define como el cociente entre la energía eléctrica producida y la energía solar interceptada por su superficie. Cuando se optimiza la carga que la célula debe alimentar el rendimiento es máximo y está dado por:

$$\eta = \frac{Pm}{I} = \frac{Im \cdot Vm}{I} = \frac{(FF) \cdot Isc \cdot Voc}{I}$$

donde *I* es el producto de la insolación por la superficie efectiva de la célula.

Los factores que influyen en el rendimiento de una célula son múltiples: unos de tipo interno o externo (características del material, espesor de la oblea, superficie activa, geometría de los contactos, etc.) y otros ambientales (temperatura de operación, composición espectral de la radiación etc.). Algunos de estos factores son de mayor interés práctico que otros, sobre todo desde el punto de vista del usuario.

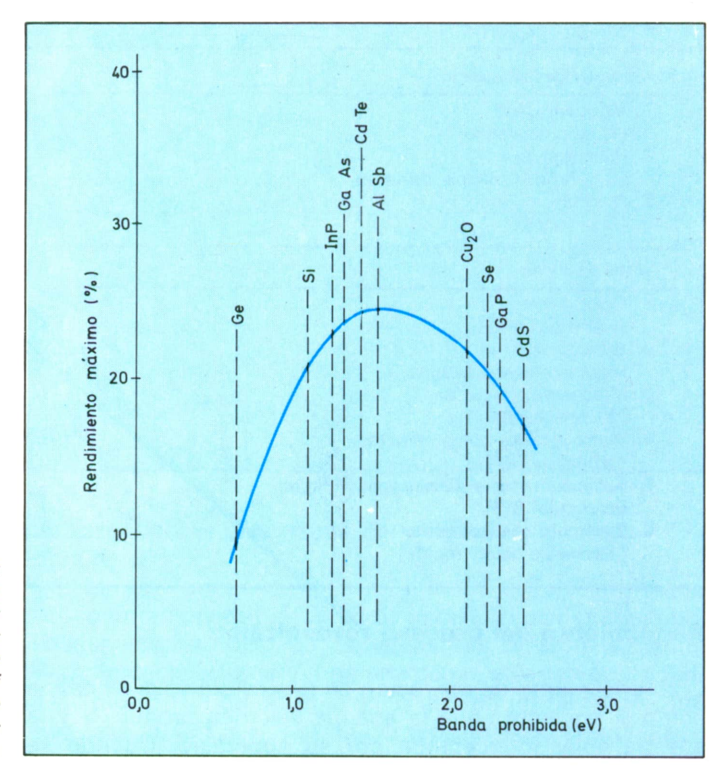
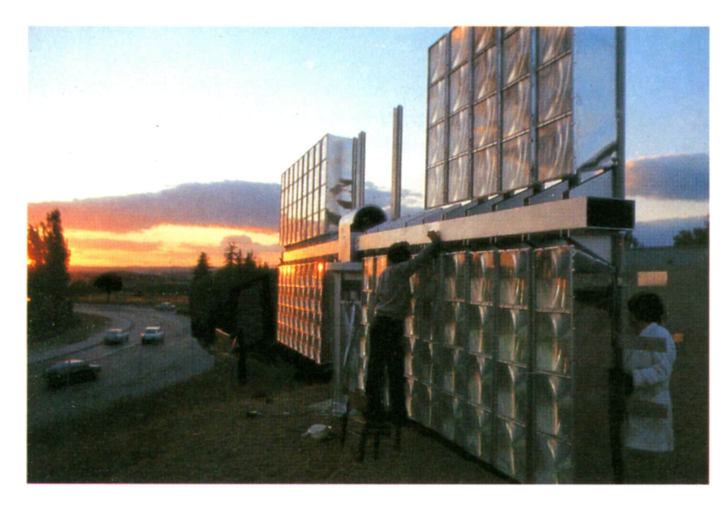


Figura 17. Rendimientos máximos teóricos de células solares fabricadas con diferentes semiconductores. Se puede observar que el Si no es el material que puede dar mayores rendimientos.

La figura 17 muestra los valores teóricos calculados para diferentes materiales semiconductores en función de la anchura de la banda prohibida y suponiendo en todos los casos que la insolación es la correspondiente al exterior de la atmósfera. Si el mismo cálculo se repite con la energía que se recibe en la superficie terrestre, se conserva la forma de la

curva pero los rendimientos se hacen algo mayores. Se puede ver que, en estas condiciones, el máximo rendimiento teórico de una célula de Si convencional es del orden de 22-23 %. En la práctica, el máximo rendimiento obtenido es del orden del 18 % si bien el progreso en este campo es continuo y se puede citar, por ejemplo, que un grupo investigador español ha puesto a punto un nuevo tipo de célula solar de Si, denominada *bifacial*, con rendimientos globales del orden del 20 %. En general, las células disponibles en el comercio tienen un rendimieno del orden del 14-15 %, rendimiento que disminuye al 10-11 % cuando se montan en paneles fotovoltaicos.



Panel fotovoltaico de concentración, Ramón Areces. Desarrollado por el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid.

Entre los factores ambientales que afectan al rendimiento de la célula solar de Si (no necesariamente a las fabricadas con otros materiales) merece la pena comentar la temperatura: al aumentar la temperatura por encima de la ambiental el rendimiento disminuye, razón por la que es necesario refrigerar las células cuando su temperatura de operación va a ser superior a 40-45ºC. La temperatura depende, en general, de la intensidad de la radiación solar que también afecta a los parámetros de la célula: la corriente en cortocircuito es proporcional a la intensidad de la radiación y la tensión en circuito abierto apenas varía con ella.

En relación con el concepto de rendimiento de un sistema fotovoltaico (y en concreto de una célula solar) hay algunos parámetros en los que es conveniente reparar. Se denomina *potencia pico* de una célula fotovoltaica a la potencia eléctrica que proporciona cuando recibe insolación máxima ($\simeq$1 kW/m^2), es decir, al mediodía de un día despejado. Este concepto es equivalente al de potencia instalada en una central convencional. La potencia pico se expresa en vatio o kilovatio pico (Wp, kWp) y, como concepto, es igualmente aplicable a los paneles fotovoltaicos que se describen en el siguiente apartado.

TECNOLOGIAS DE FABRICACION DE CELULAS Y MODULOS FOTOVOLTAICOS

El proceso de fabricación de una célula solar comercial de Si monocristalino se compone de tres grandes etapas. Las células no son los elementos que se utilizan en las aplicaciones prácticas, sino que, con objeto de lograr potencias mayores, se acoplan en serie y paralelo para obtener mayores tensiones y corrientes formando lo que se denomina *módulo fotovoltaico*, que es el elemento que se comercializa para instalar y cuya fabricación constituye la cuarta y última etapa del proceso.

Fabricación de la célula solar

El material de partida para la fabricación de una célula es Si de alta pureza (denominado de *grado semiconductor*) que a su vez se ha obtenido partiendo de SiO_2 (básicamente cuarzo, cuya abundancia en la naturaleza elimina problemas de abastecimiento). El Si de grado semiconductor es el que habitualmente se utiliza en la industria electrónica y, debido a su calidad, su precio es un factor muy influyente en el coste final de la célula solar. Hoy se reconoce con generalidad que un Si de menor pureza (y menor precio) sería suficiente para la fabricación de células. De hecho, se investiga sobre la posibilidad de preparar un material, denominado Si de *grado solar*, que contuviera impurezas que no distorsionaran las prestaciones de la célula. En una etapa más avanzada de este proceso se prevé utilizar Si de *grado metalúrgico* ($\simeq$98 % de pureza) como material útil para la fabricación de células solares.

La etapa siguiente en el proceso de fabricación es la obtención de obleas monocristalinas utilizando como materia prima el polvo de Si de alta pureza, etapa que se denomina *crecimiento* del monocristal. Las técnicas de crecimiento más utilizadas emplean el método Czochralski, en homenaje a su inventor. En el crecimiento de un monocristal se consiguen dos objetivos: una purificación suplementaria del material y la creación de una estructura cristalina notablemente perfecta, gracias a la cual la futura oblea de Si gozará de propiedades semiconductoras. El

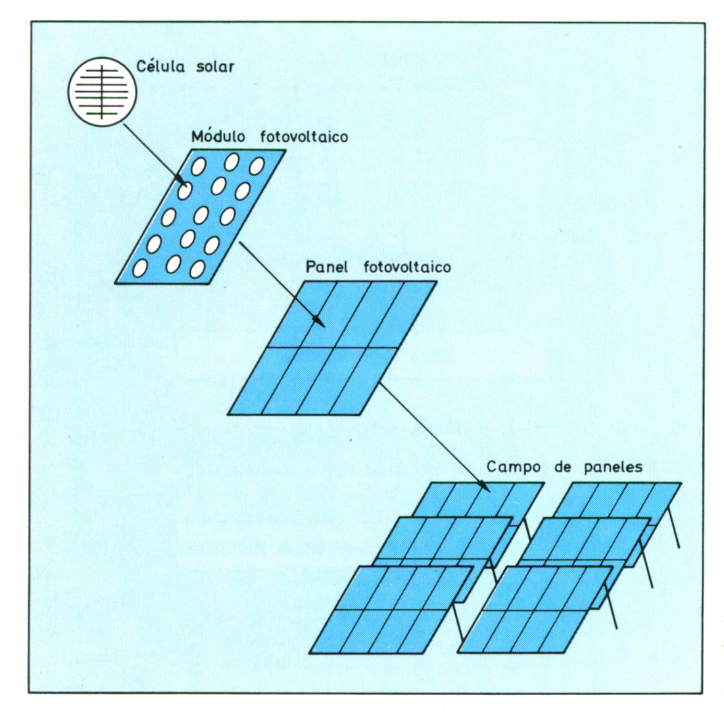
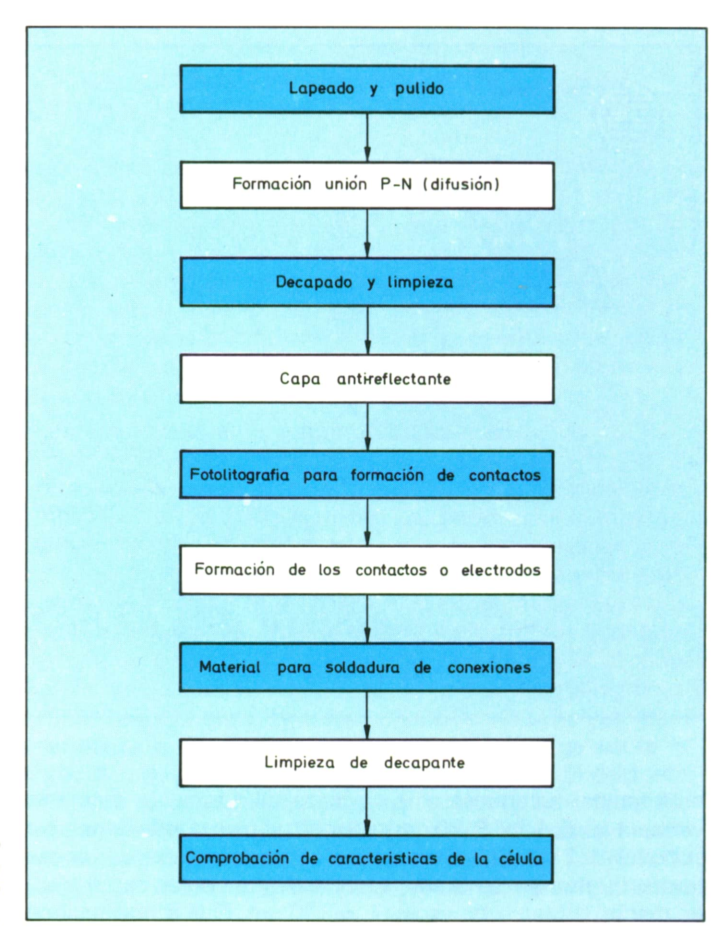


Figura 19. Evolución desde la célula al campo de paneles, base de las centrales fotovoltaicas. El elemento que se comercializa es el módulo. El número de módulos que componen un panel depende de la aplicación.

monocristal resultante es una pieza cilíndrica de diámetro variable (2, 5, 10, 15, 20 cm) y longitud que puede llegr a ser superior a 1 m. Esa producción se lleva a cabo en pocas horas. La «barra» de Si se corta, mediante sierras especiales, en discos (obleas) de espesor $\simeq 300\ \mu m$. Esta etapa supone

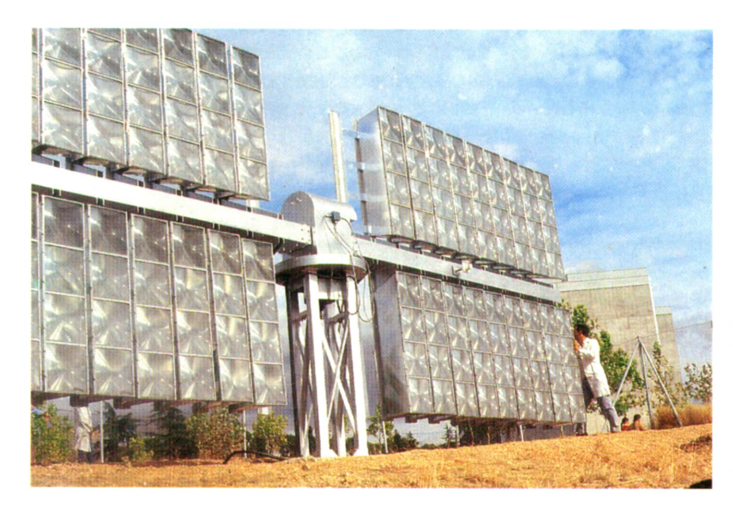
la pérdida de $\simeq 60$ % del material de la barra en forma de «serrín» de Si. Al mismo tiempo, el proceso es energéticamente costoso y de baja velocidad de producción. Por estas razones se han desarrollado nuevos procedimientos de crecer monocristales de Si (crecimiento en cinta, etc.), algunos de los cuales han superado las etapas de laboratorio.

Finalmente, la oblea debe ser procesada para obtener la célula solar aplicando diferentes etapas, que han sido esquematizadas en un cuadro adjunto, y de las cuales sólo se



Diferentes fases que se han seguido en la obtención de una célula solar.

describirán algunas por razones de extensión. Son esenciales: la formación de la unión p-n y la formación de los contactos eléctricos o electrodos, aunque la preparación de una capa antirreflectante de calidad es de suma importancia para lograr un alto rendimiento final.



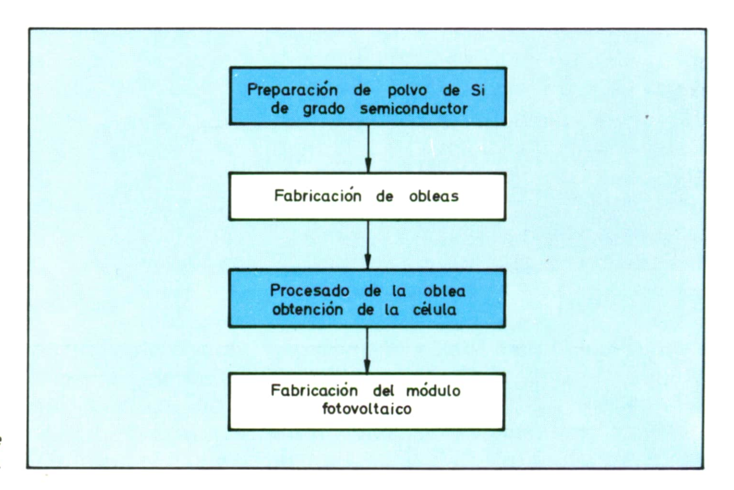
El Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid ha desarrollado un panel experimental de células fotovoltaicas suficientes para producir energía con un rendimiento aceptable.

La difusión para formar la unión p-n es, posiblemente, la etapa más crítica de todas las que constituyen el proceso de fabricación. La temperatura de la difusión, su duración, posibles contaminaciones por impurezas, etc., son importantes variables que, prácticamente, determinan la profundidad de la unión, la resistencia superficial, la vida de los portadores en la zona difusa de la unión, etc. factores que afectan al comportamiento de la célula y que, por lo tanto, deben ser tenidos en cuenta necesariamente.

Una superficie de Si bien pulida, como es la de una célula solar, refleja aproximadamente el 34 % de la radiación de longitud de onda larga ($\simeq 1{,}1\ \mu m$) y un 54 % si la luz es de $\simeq 0{,}4\ \mu m$ (azul-violeta).

Una adecuada capa antirreflectante puede reducir esos valores a un tanto por ciento bajo, aumentando considerablemente la cantidad de energía que penetra en el volumen de la oblea. La alta reflexión del Si se debe al valor (3,4 a 4,4) de la parte real de su índice de refracción comparado

con el del aire. La antirreflexión se produce depositando sobre la superficie del semiconductor una o varias capas de materiales, cuyos índices de refracción sean intermedios entre el del Si y el del aire, de tal forma que exista un acoplamiento óptico gradual entre ellos. Esas capas, denominadas capas o láminas antirreflectantes, son generalmente óxidos de Si, Ti, o Ta. Se preparan mediante técnicas de deposición en vacío, oxidación térmica, etc., pero, en cualquier caso, su espesor debe ser controlado cuidadosamente ya que sólo se obtienen mínimos de reflexión para ciertos valores del espesor de la lámina, debido a los procesos de interferencia que en ella tienen lugar.



Fases en la fabricación de un módulo fotovoltaico.

En la preparación de los electrodos de la célula solar se utilizan una gran variedad de técnicas y materiales. Entre aquellas cabe citar: *evaporación en vacío, sputtering, electroplateado, plateado sin electrodos* (electroless), *película gruesa*, etc. y como materiales comúnmente utilizados mencionaremos el Ti, Pd, Ag, Al, Ni, Au, Cu, etc. En todos los casos, una vez realizado el depósito del material(es) que ha de constituir el electrodo, la oblea se somete a un cierto tratamiento térmico para que el metal penetre ligeramente en el Si y ambos materiales se *sintericen*. Se consigue así un buen contacto eléctrico y mecánico entre oblea y electrodo.

Fabricación del módulo fotovoltaico

Aunque el número de componentes que intervienen en la construcción de un módulo fotovoltaico suele ser universal, su estructura, diseño, dimensiones, materiales utilizados, etc. varían enormemente según el fabricante. Esto también significa que la potencia pico de un módulo fotovoltaico es variable según el modelo (número de células en serie-paralelo, tamaño de células, calidad, etc.) aunque en la actualidad el módulo de más difusión comercial es de $\simeq 33$ Wp, compuesto por unas 36 células de 10 cm de diámetro.

En la figura 23 se ha representado la estructura de un módulo fotovoltaico convencional indicando los componentes fundamentales. La cubierta superior, de vidrio, tiene una misión principalmente protectora y debe presentar una excelente transmisión a la radiación solar en su conjunto, aunque es preferible que actúe de pantalla de la radiación ultravioleta para evitar que ésta degrade el material encapsulante. Es deseable que la lámina de vidrio posea buenas propiedades mecánicas, resistencia a la fractura y al impacto, por ejemplo. Al mismo tiempo, su cara exterior debe ser fácil de limpiar y resistente a agentes corrosivos.

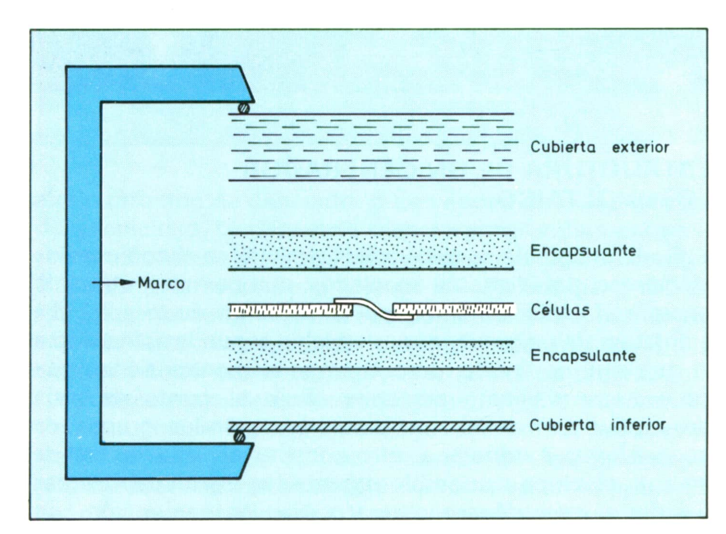


Figura 23. Esquema de la estructura de un módulo fotovoltaico con utilización de sus principales componentes. Cada fabricante, sin embargo, introduce sus propias variaciones y alternativas al esquema de la figura.

Sistema generador fotovoltaico de 35 kWp para la electrificación rural en Túnez. Esta pequeña central satisface las necesidades energéticas de una comunidad de 100 personas.

La misión del material encapsulante es proteger las células solares y sus terminales de toda posible influencia destructiva o degradante. Debe actuar como amortiguador de golpes, impactos y vibraciones, ser altamente resistente a la radiación ultravioleta, y muy transparente al resto de longitudes de onda del espectro solar. Al mismo tiempo, debe ser adecuado en precio. En la práctica se utilizan diferentes tipos de siliconas, acetatos, acrilatos, etc. El resto de elementos del módulo cumple, esencialmente, misiones mecánicas.



ESTRUCTURA DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO

Suele denominarse generador fotovoltaico al conjunto de elementos, debidamente acoplados, que permiten utilizar la energía eléctrica obtenida por conversión de la solar. La estructura de un generador es variable según la aplicación a la que está destinado, pero algunos elementos tienen que estar necesariamente presentes. Bajo el punto de vista descriptivo conviene considerar dos grandes grupos de generadores: *autónomos,* que constituyen una fuente de energía eléctrica disponible durante las veinticuatro horas del día, y *no autónomos,* que operan en conjunción con

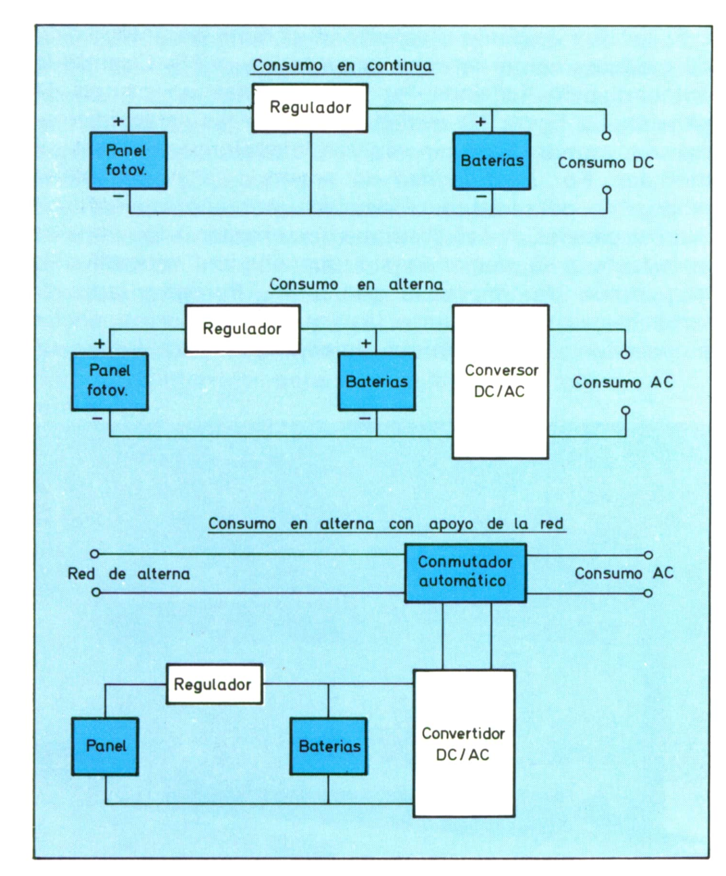


Figura 25. Diagrama de la estructura de los generadores fotovoltaicos que alimentan diferentes posibles consumos. Se han señalado los componentes más importantes, pero en esto también introduce variaciones cada diseñador.

algún otro tipo de generador o con apoyo de la red general de electricidad. La diferencia esencial entre ambos es que el primero contiene algún sistema de acumulación de energía eléctrica y el segundo prescinde de él. Los generadores fotovoltaicos autónomos se componen de tres subsistemas: *el panel fotovoltaico*, donde la energía solar se convierte a corriente continua, *el regulador-conversor electrónico* y el *subsistema acumulador* formado, generalmente, por baterías electroquímicas. El acoplamiento de esos tres subsistemas se realiza en función del tipo de consumo que vaya a satisfacer el generador fotovoltaico, tal y como se ve en la figura 25 donde el esquema inferior describe un generador híbrido.

El sistema de panel o paneles se obtiene por integración de módulos como se observa en la figura 19. Cuando la potencia pico instalada es alta se utiliza un campo de paneles. La figura 19 evidencia una de las características más relevantes de los generadores fotovoltaicos: su carácter modular. Por *modularidad* se entiende la posibiliad de ampliar la potencia pico instalada por acoplamiento de nuevos paneles. Así se consigue que el sistema fotovoltaico se adapte a la demanda sin que sea un imperativo la adquisición de un nuevo generador. Por otro lado, es también importante destacar la necesidad de que los paneles se instalen en una forma determinada para lograr un



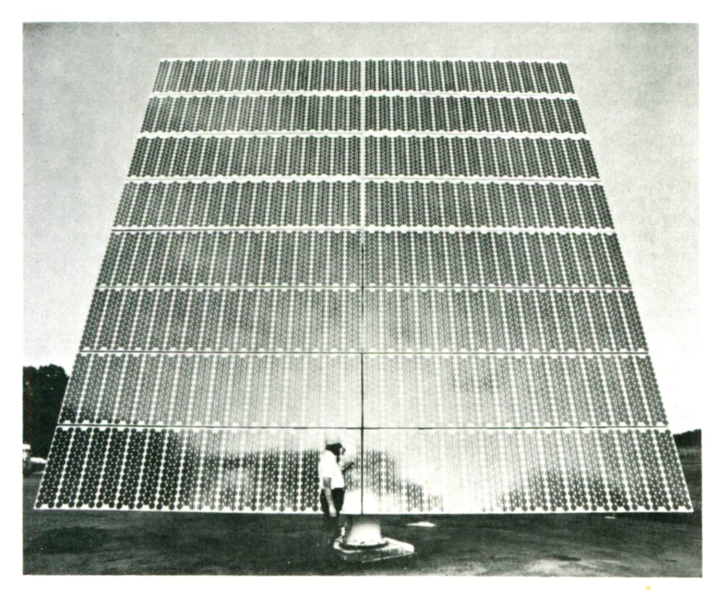
Un sistema solar combinado instalado en el aeropuerto de Forth Worth (Texas) genera una potencia eléctrica de hasta 27 kWp. Este concentrador emplea 11 seguidores y complementa la potencia de salida de la instalación del aeropuerto.

aprovechamiento máximo de la radiación existente. En el hemisferio Norte los paneles deben estar orientados al Sur y en el Sur deben estarlo al Norte. La inclinación de los paneles respecto a la horizontal es una función de la latitud del lugar, pero como criterio general es aceptable suponer que se obtiene un aprovechamiento óptimo de la radiación solar anual con una inclinación que sea igual a la latitud del lugar más unos ocho grados, aunque la decisión final sobre este punto está determinada por el tipo de consumo a satisfacer.

El sistema de paneles fotovoltaicos posee una vida larga,

unos 20 años, al fin de los cuales su rendimiento debe ser del orden del 75 % inicial. La pérdida de rendimiento con el tiempo o envejecimiento del panel se debe a diferentes causas, las cuales hacen que entre los 20 y 25 años su degradación sea acelerada y descienda el rendimiento hasta valores despreciables.

Otros factores afectan al rendimiento de la conversión fotovoltaica en forma recuperable. Ya se ha mencionado la influencia de la temperatura, que hace que las mejores prestaciones de un panel no se obtengan en los meses de mayor insolación (julio-agosto), por ser de elevadas temperaturas, sino en aquellos que, teniendo buena insolación, presentan temperaturas más bajas (mayo, junio, septiembre).



Un panel fotovoltaico dotado de movimiento para seguir la trayectoria del Sol y recibir siempre la radiación con incidencia normal. (Cortesía: Arco Solar).

El sistema de acumulación de energía eléctrica de un generador fotovoltaico tiene un cometido múltiple. Por un lado debe actuar como fuente de energía parcial o total en épocas de menor insolación (invierno) y en horas de no insolación (noche). Debe, además, garantizar que el

generador proporcione energía en el caso de que se presenten un número determinado de días nublados seguidos, en otras palabras, debe dotar de autonomía al sistema. Actúa también, en conjunción con el regulador electrónico, como estabilizador de la tensión de funcionamiento de la instalación en valores bien definidos. Finalmente, gracias al sistema de acumulación se asegura que el generador pueda alimentar equipos de alta potencia durante períodos cortos.



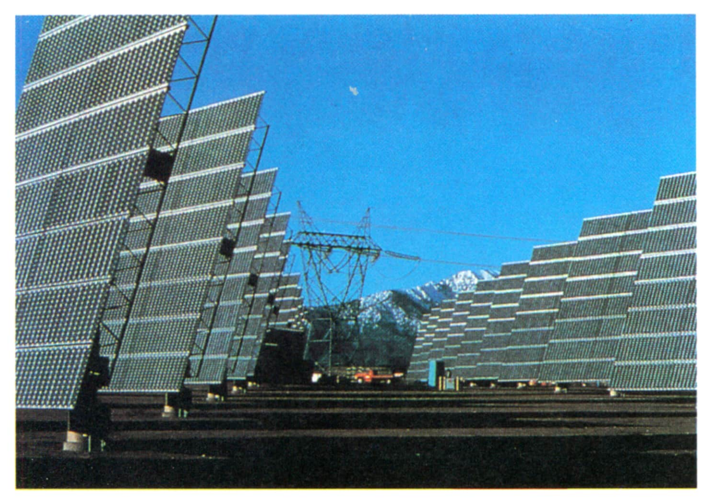
Central fotovoltaica de 1 MWp a base de acoplar un considerable número de paneles solares. (Cortesía: Arco Solar).

Los acumuladores que se utilizan actualmente en los generadores fotovoltaicos son de Pb-ácido, tanto del tipo Pb-Sb como Pb-Ca. Cada uno de ellos ofrece ventajas e inconvenientes y la decisión final debe ser consecuencia de un buen asesoramiento. Conviene destacar que hay algunos modelos de acumulador, del tipo conocido como estacionario, más preparados para las aplicaciones fotovoltaicas, aunque no existe todavía ninguna variedad específicamente adaptada a esa aplicación.

Determinados equipos electrónicos auxiliares son imprescindibles si se desea obtener un máximo de prestaciones de la instalación fotovoltaica. De entre ellos resulta especialmente interesante conocer las características y papel del regulador de carga. El regulador tiene como misiones más importantes las siguientes: evitar sobrecargas de las baterías

desconectándolas del panel cuando ya estén cargadas; evitar la descarga de las baterías a través de los paneles en las épocas u horas en que éstos generan insuficiente energía por ser baja la insolación; proteger contra la inversión de polaridad, que se puede producir por error de conexión o de fabricación de los acumuladores; adaptar la tensión de carga a la requerida por los acumuladores según su estado de carga, etc., Algunos reguladores ofrecen otras prestaciones, como por ejemplo, la posibilidad de seguir el punto de máxima potencia del panel cualquiera que sea la insolación que reciban.

Se reconoce ahora que algunas de las misiones más importantes de un regulador exigen un buen conocimiento instantáneo del estado de carga del acumulador. Actual-

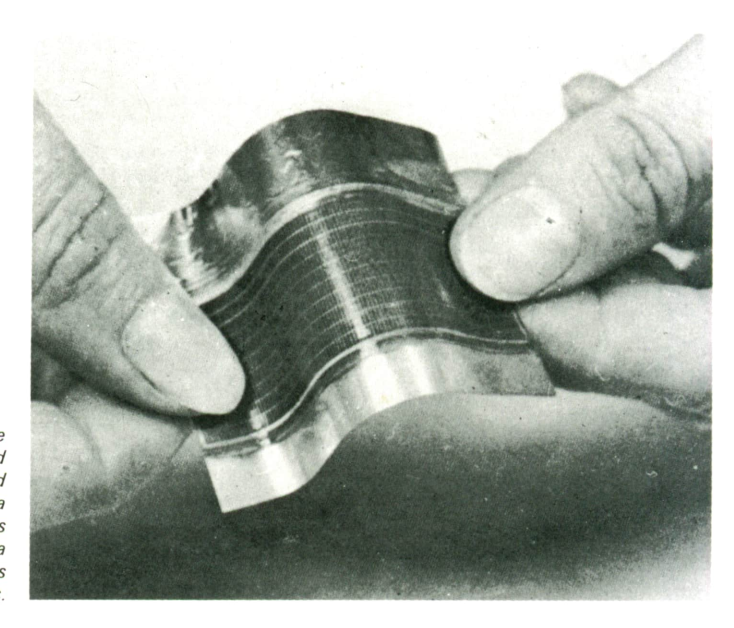


Sistema productos de energía fotovoltaica con capacidad para generar 1 MWp. Está instalado en California y alimenta a un total de 400 viviendas. Utiliza los seguidores de doble eje tendentes a maximizar la potencia de salida durante todo el año.

mente, se utiliza la *tensión en circuito abierto* como parámetro detector del estado de carga, a pesar de que los fabricantes de acumuladores no consideren que dicha medida sea de total garantía. En cualquier caso, sí debe destacarse que el regulador de carga es un componente fundamental en una instalación fotovoltaica, ya que influye directamente en un buen uso de los acumuladores y en su vida.

APLICACIONES DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Sin duda este es el apartado más espectacular de los que se tratan en este libro. El capítulo de las aplicaciones fotovoltaicas es tan vivo en la actualidad, que no resulta exagerada la siguiente afirmación: cuando este trabajo salga a la calle, posiblemente sean reales algunas formas de utilizar la electricidad solar fotovoltaica que ahora sólo considera- mos como posibles.



Una célula solar de película delgada (Cd S/Cu S). La flexibilidad que se muestra en la fotografía es propia de las células de película fina producidas sobre soportes no rígidos.

Bajo un punto de vista histórico, la plataforma de lanzamiento de las células solares fueron los satélites artificiales que transportan su propio generador eléctrico para alimentar los equipos de toma de datos, transmisión y meteorológicos. En competencia con otros generadores (termoeléctricos, pilas de combustible, etc.) las células solares presentaban algunas ventajas: peso reducido, larga vida, ocupación de espacio mínimo, nivel de insolación elevado y continuo, ya que el satélite se mueve fuera de la

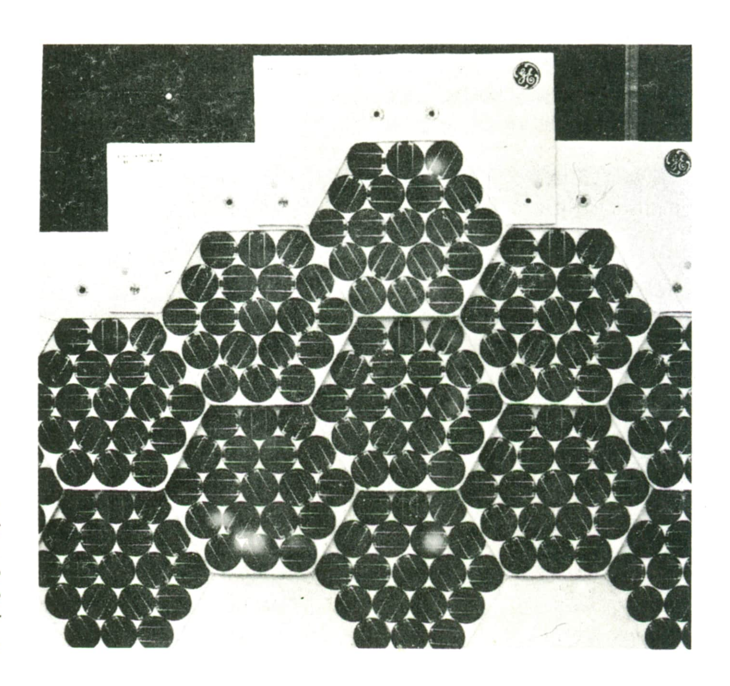
atmósfera en órbita geosíncrona, etc. Los ejemplos de esta aplicación son abundantes y, de hecho, en la actualidad casi todos los satélites para fines pacíficos (meteorológicos y de comunicación) generan la energía que precisan mediante paneles fotovoltaicos incorporados en su superficie exterior o transportados en alerones extensibles. Resulta especialmente llamativo el Skylab americano que se alimentó con paneles fotovoltaicos de potencia pico equivalente a 15 kW.



Algunas aldeas de la Sierra del Segura están siendo electrificadas con energía solar fotovoltaica (Cortesía: Instituto de Energías determinativas de la Junta de Energía Nuclear-Madrid).

Las circunstancias económicas que caracterizaron los primeros años de la década de los setenta plantearon en un primer momento la posibilidad, y luego hicieron realidad un descenso a la tierra de generadores fotovoltaicos. Ahora bien, en las aplicaciones espaciales se exige alta duración y gran fiabilidad y el coste de los componentes no suele ser un factor limitante. En las aplicaciones terrestres, sin embargo, el factor económico era totalmente decisivo si se deseaba una utilización generalizada de los sistemas fotovoltaicos. Se inició, por tanto, en aquellos años (1972-73) una tremenda carrera cuya meta era la simplificación y el descubrimiento de nuevas tecnologías, procesos, e investigación de nuevos materiales, que condujera a un abaratamiento de las células solares y demás componentes del generador fotovoltaico, para hacerlo competitivo con los

sistemas de generación ya en uso en la sociedad actual. Dichos esfuerzos (de capital y humanos) han rendido ya amplios resultados y es de esperar que otros muchos estén por venir.



En ocasiones se diseñan módulos y paneles adecuados a un problema. Los de la fotografía se denominan «teja» porque se acoplan para formar tejados de casas.

Viviendas aisladas y de nueva construcción

Se debe entender por este tipo de viviendas aquellas en las que no se ha incorporado energía eléctrica mediante la red general, bien por su aislamiento geográfico bien por su reciente construcción en zonas no urbanizadas. El uso de estas viviendas es, con frecuencia, intermitente (fines de semana, períodos vacacionales, etc.) y los consumos de energía eléctrica en ellos no son tan elevados como en las viviendas urbanas. En estas circunstancias, es cada vez más frecuente que la instalación de un generador fotovoltaico o autónomo sea más rentable que costear la extensión de la línea general o que utilizar un generador autónomo que consume combustible.

Se calcula que, en 1982, había en España unas 6.000 viviendas fotovoltaicas autónomas distribuidas por las zonas más soleadas. Esta cifra cobra toda su dimensión si se tiene en cuenta que la utilización generalizada de los sistemas fotovoltaicos no se inició en España hasta bien entrado el año 1979. Por otro lado, el número de usuarios potenciales, tanto en España como en el resto del mundo, es elevadísimo. A título orientativo se puede citar que una de tales viviendas con un consumo eléctrico medio, situada en una zona de insolación media nacional se abastecería con una instalación de 36 a 72 W de paneles fotovoltaicos y una acumulación entre 125 y 275 Ah.



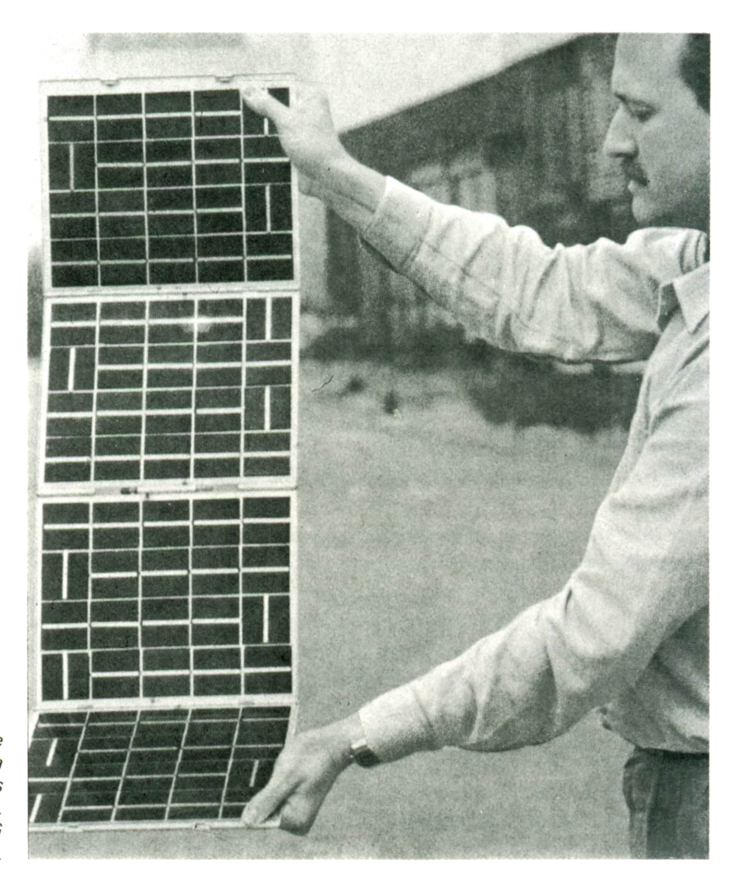
Una de las aplicaciones más frecuentes de la energía solar fotovoltaica consiste en el suministro de electricidad para viviendas particulares o casas «fin de semana». Esta imagen es muy frecuente en nuestras soleadas costas, especialmente en la zona del Mediterráneo.

Electrificación rural

La electrificación de ciertas zonas rurales por los medios convencionales supone, generalmente, una inversión de baja rentabilidad, ya que deben realizarse extensiones de líneas amplias y difíciles a núcleos de población reducidos y con muy bajo consumo eléctrico. Estas circunstancias determinan la existencia de numerosas zonas rurales no electrificadas. En nuestro país el número de habitantes y pequeños núcleos de población afectados por este problema es tan elevado, que solamente a través de un Plan Nacional

de Electrificación Rural (PLANER) parecía reducible la situación. A nivel mundial se ha calculado que hay más de tres millones de núcleos de población sin electrificar. Al mismo tiempo, hay que constatar que el abandono que se ha producido en los últimos años de pueblos, aldeas y pequeñas poblaciones se ha debido en gran parte a su aislamiento, falta de servicios y comodidades mínimas. La energía eléctrica, llevada a aquellos lugares que carezcan de ella, puede contribuir a reducir esa tendencia despoblatoria e, incluso, a favorecer un retorno.

Los planes convencionales de electrificación rural han aportado soluciones escasas a los problemas existentes. Por



Este generador plegable es una demostración de la adaptabilidad de los módulos fotovoltaicos. (Cortesía: AEG Telefunken).

el contrario, se hace cada vez más lógica y aceptable la posibilidad de realizar la electrificación rural mediante generadores fotovoltaicos autónomos, posibilidad que fue analizada y discutida con detalle, para las circunstancias nacionales, en 1976. Desde entonces no ha cesado la insistencia de los expertos en esta aplicación y, en la actualidad, la idea está totalmente asentada. El carácter modular del generador fotovoltaico permite la electrificación progresiva de un pueblo en función de su incremento demográfico y aumento de consumo.



Otra de las aplicaciones fotovoltaicas que están divulgándose rápidamente consiste en instalaciones eléctricas en medios rurales. En la fotografía puede apreciarse un panel fotovoltaico instalado en una granja de la región catalana en la que el acceso del tendido eléctrico resultaría excesivamente costoso.

Comunicaciones

Los generadores fotovoltaicos son una excelente solución cuando hay necesidad de transmitir cualquier tipo de señal o información desde un lugar aislado en el que no hay tendido eléctrico que alimente los equipos necesarios; los reemisores de señales de TV, plataformas de telemetría, radioenlaces; estaciones meteorológicas, etc., se engloban en esta gama

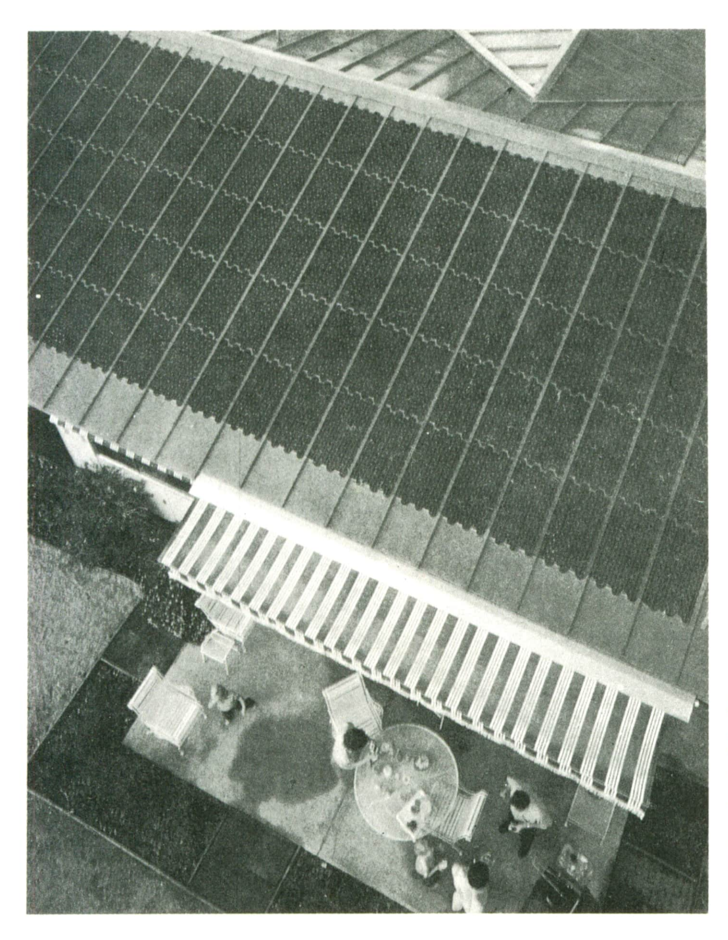
de aplicaciones. Merece la pena comentar el caso de los reemisores o repetidores de TV.

La misión de los repetidores es hacer llegar las señales a aquellas zonas que quedan en «sombras» de la señal del



Una imagen que empieza a ser cada vez más frecuente en España. Un panel fotovoltaico encargado de suministrar energía eléctrica a un reemisor de TV ubicado en zonas elevadas próximas a pequeñas poblaciones.

emisor principal. Para aumentar la cobertura de las emisiones actuales ($\simeq$97 % en el primer programa, $\simeq$86 % en el segundo) es necesario llegar a zonas muy puntuales, para lo que se exigen remisores de muy baja potencia e, incluso, microemisores ($<$1 W).



En esta vivienda unifamiliar el generador fotovoltaico es, al tiempo, el tejado. Este tipo de generadores están conectados a la red general con la que intercambian energía eléctrica. (Cortesía: Arco Solar).

Ayuda a la navegación

Este apartado ofrece una gran variedad de aplicaciones relativas a la navegación misma y a sus señalizaciones. Las dificultades que supone alimentar eléctricamente faros, boyas, balizas, plataformas y embarcaciones, han hecho que los generadores fotovoltaicos se desarrollen ampliamente en esta gama de utilidades. España es quizás, a pesar de su amplio litoral y buena insolación, un país con bajo nivel de instalaciones de este tipo.

Transportes terrestres

Numerosos aspectos problemáticos de este sector han encontrado una adecuada solución gracias a los sistemas fotovoltaicos. La seguridad vial se ha visto favorecida por generadores solares que iluminan cruces de carreteras peligrosos, túneles prolongados que carecen de iluminación y que, durante las horas de sol, exigen una rápida adaptación



La señalizaciones marinas, como el faro de la fotografía, han encontrado en los generadores fotovoltaicos un soporte valioso. (Cortesía: Sharp).

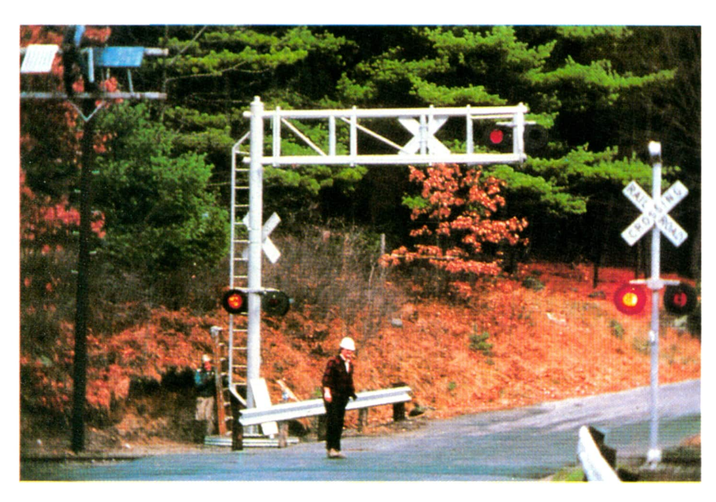
del ojo del conductor desde la visión natural a la de los focos de los coches, o que alimentan radioteléfonos de emergencia o puestos de socorro instalados lejos de las líneas eléctricas. No es infrecuente observar en las carreteras españolas instalaciones de este género. Otro tanto se puede decir del transporte por ferrocarril, donde la energía solar fotovoltaica se utiliza ya en aplicaciones que van desde la señalización exterior de vagones a la alimentación de pasos a nivel automáticos, cambios, etc.



Desde el año 1976 este sistema de 136 Wp suministra energía al sistema de señalización ferroviaria en el estado de Luisiana (EE.UU.).

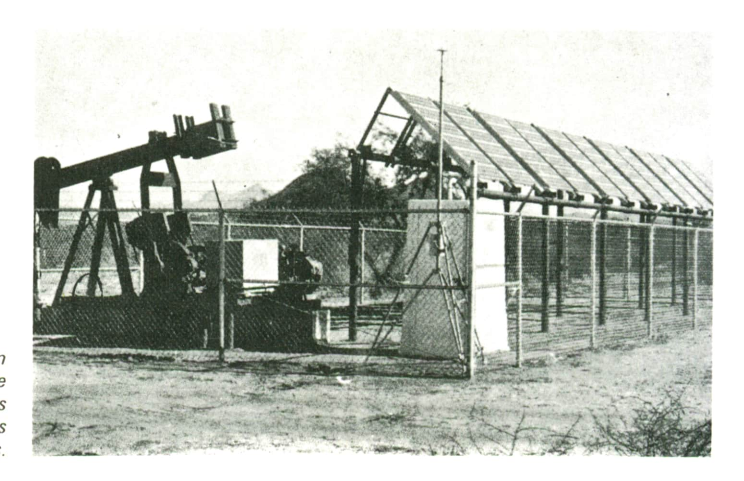
Agricultura. Ganadería

Estos sectores, en un sentido amplio, son objeto de considerable atención en nuestro país y están muy conectados con otros ya citados (electrificación de viviendas, rural, etc.). En relación a las instalaciones típicamente agrícolas y ganaderas, hay que constatar que diferentes tipos de granjas



En Massachusetts, dos sistemas, uno de 20 Wp y otro de 36 Wp alimentan los circuitos de aviso luminoso y las campanas de alarma de un paso a nivel.

de crianza (pollos, cerdos, etc.) obtienen la energía eléctrica que consumen (iluminación, ventilación, etc.) a partir de generadores fotovoltaicos. Es favorable el hecho de que estas granjas se construyen alejadas de los núcleos de población por razones de higiene.



El bombeo de agua en zonas rurales es una de las aplicaciones presentes y futuras de los sistemas fotovoltaicos.

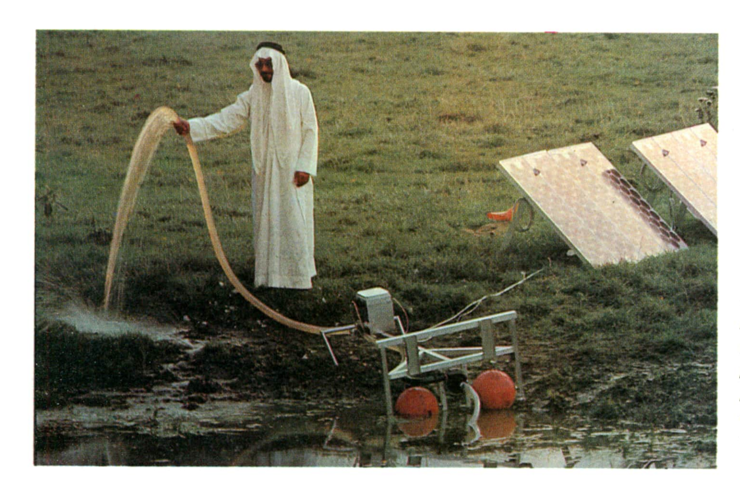
Sin embargo, la aplicación de mayor impacto y futuro de los generadores fotovoltaicos en la agricultura es la alimentación de sistemas de bombeo de agua y riesgo por goteo de productos de alto valor, riesgos a baja presión, bombeo para viveros, etc. El bombeo de agua subterránea en bajos caudales se explota ampliamente en países de Africa y Oriente Medio. Las instalaciones de mayor potencia que existen son experimentales, cabe citar una en Mean (Nebraska) de 25 kW, capaz de regar 33 hectáreas en la época de riego y de proporcionar energía para el secado del grano una vez se ha recogido la cosecha de maíz. Para bombear altos caudales (circunstancia frecuente en algunas zonas de España) la realización de un generador fotovoltaico no ofrece dificultades técnicas, y la única limitación existente es la inversión requerida.

Otros aspectos relacionados con posibles o presentes aplicaciones fotovoltaicas son la vigilancia forestal para prevención de incendios, el bombeo de agua a depósitos contra incendios etc. Y en la gama de aplicaciones menores

cabe citar pastores eléctricos, sistemas de fumigación, trampas para insectos, entre otras.

Aplicaciones en la industria

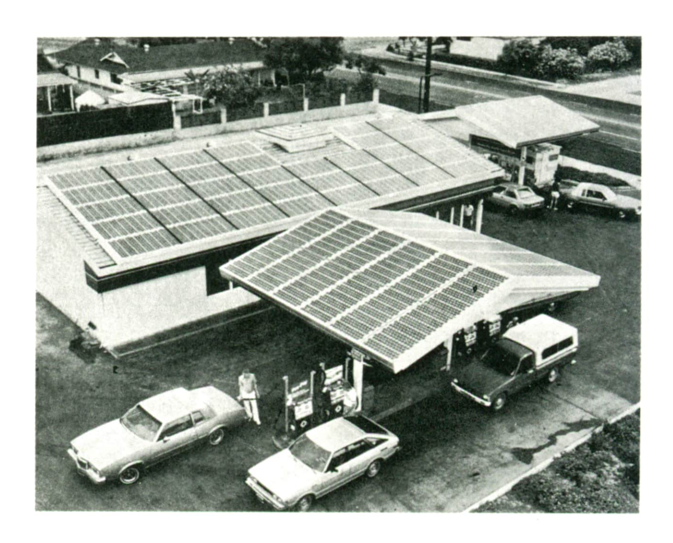
Salvo en las industrias del sector agropecuario ya citado, las instalaciones existentes son estrictamente piloto y realizadas bajo condiciones experimentales. De los diferentes tipos de industrias, aquellas donde el consumo es de corriente continua son las que ofrecen mayores expectativas para una relativamente próxima utilización de la electricidad fotovoltaica. Merece la pena destacar la obtención de metales (cobre, aluminio, etc.) por electrolisis y la fabricación de acumuladores electroquímicos. En laboratorios universitarios y de desarrollo las experiencias en este terreno son numerosas. Por ejemplo, la Universidad Central de Santiago de Chile cuenta con una instalación piloto de 144 paneles fotovoltaicos convencionales que proporcionan energía para el refinado del Cu.



Esta imagen refleja la modularidad y adaptabilidad de los paneles fotovoltaicos. Los países árabes son importantes consumidores de sistemas solares. (Cortesía: Sharp).

En otra dirección es también interesante destacar algunos otros ejemplos. Las necesidades de agua pura en la minería, han impulsado a la firma Mobil Tyco a desarrollar un

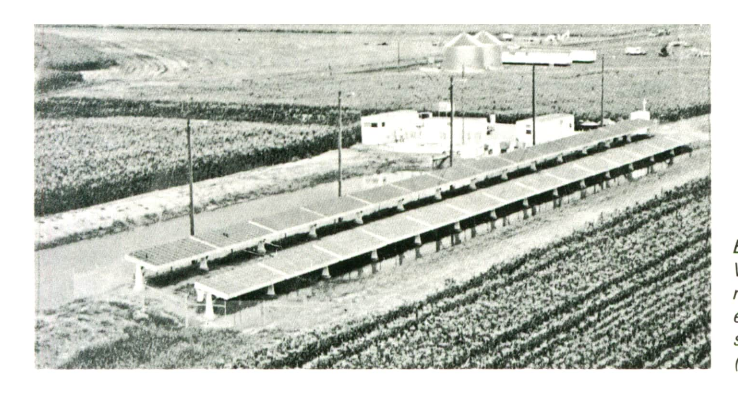
generador fotovoltaico que alimenta un purificador de agua con una unidad desmineralizadora por electrolisis para una importante extracción de mineral de uranio en Nuevo México (EE.UU.). La instalación tiene 25 kW de potencia pico fotovoltaica y 120 kW·h de capacidad de acumulación en baterías. Es, obviamente, autónoma.



Una estación de servicio autónoma alimentada eléctricamente con un generador fotovoltaico cuyos paneles se han instalado sobre los tejados. (Cortesía: Arco Solar).

Otra importante aplicación de la electricidad fotovoltaica en el sector industrial es la lucha contra la corrosión, a través de la protección catódica por corriente impresa de oleoductos, conducciones de gas, obras civiles y, en general, construcciones metálicas en contacto con un medio exterior agresivo. La misión del generador, de baja potencia, es situar el metal a proteger en un potencial catódico donde no se produce corrosión. En el caso de oleoductos y gaseoductos la distribución de las líneas de corriente está en función de las características del terreno, lo que condiciona el número de generadores que se deben instalar a lo largo del recorrido.

Como es bien sabido, el sector industrial consume, aproximadamente, el 50 % de la energía total que se utiliza en algunos países como el nuestro. Parte de esa energía lo es en forma térmica, otra en forma eléctrica, mecánica, etc. De aquí que estimular el desarrollo de soluciones solares



Esta instalación de 25 Wkp bombea agua para riego y proporciona energía eléctrica para secado del grano de maíz (Nebraska, EE.UU.).

(eléctricas y térmicas) para uso industrial sea del mayor interés para un país con política de ahorro de combustibles importados. Dentro de las posibles soluciones fotovoltaicas son viables dos alternativas, al menos: Instalaciones autónomas en el lugar de consumo y centrales fotovoltaicas con redes de distribución.



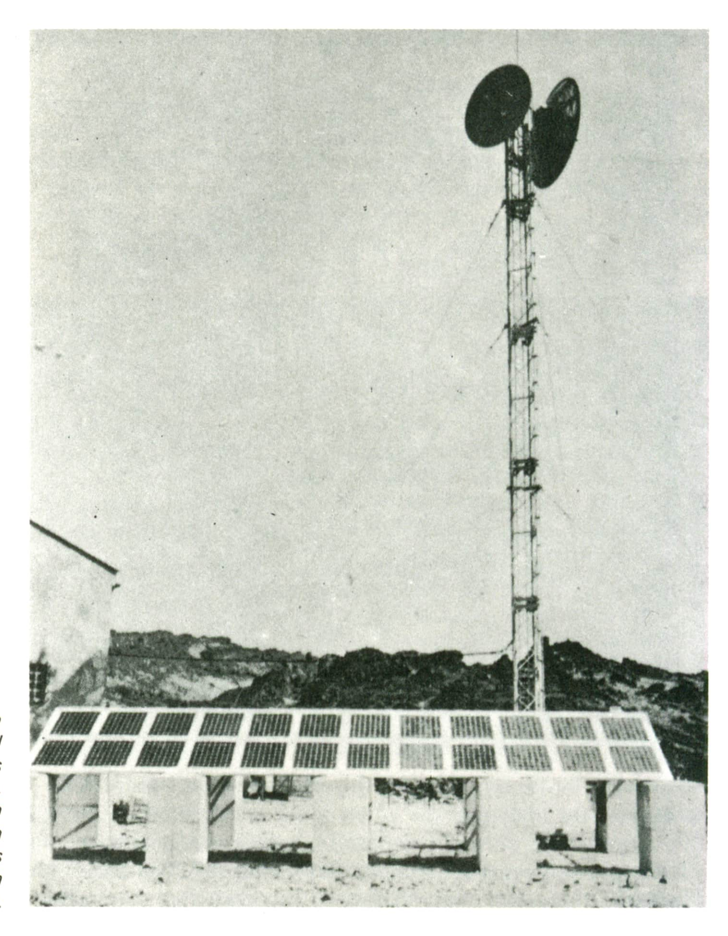
En las montañas de Sierra Estrella, Arizona, (EE.UU.), un sistema de 2 kWp alimenta un repetidor de radio de 50 canales de comunicaciones para uso privado.

Difusión de cultura

La televisión escolar es un sistema de enseñanza eficaz en aquellos países donde no se cuenta con centros y profesora-

do suficientes. Generalmente las zonas donde se aplica esta solución son aisladas o de bajo nivel de desarrollo y carecen de electrificación. La acción cultural en este sentido ha menudeado en Africa y son varias decenas las instalaciones existentes. Evidentemente, esta aplicación puede ser sólo una ramificación de la más amplia que hemos llamado electrificación rural.

Dentro de una acción cultural más variada cabe contemplar la existencia de unidades móviles que, alimentadas eléctricamente mediante generadores fotovoltaicos, recorren



La comunicación en general es campo de fácil aplicación de los sistemas fotovoltaicos. Repetidores, reemisores, etc., con alimentación fotovoltaica es algo común en muchos países. Instalación en Tenerife, cortesía: Solarex.

zonas aisladas difundiendo información mediante medios audiovisuales. De hecho, el equipo redactor de este capítulo ha recorrido varios lugares aislados de Castilla-La Mancha explicando las posibilidades de la energía solar utilizando medios audiovisuales y pequeñas demostraciones alimentados por electricidad fotovoltaica.



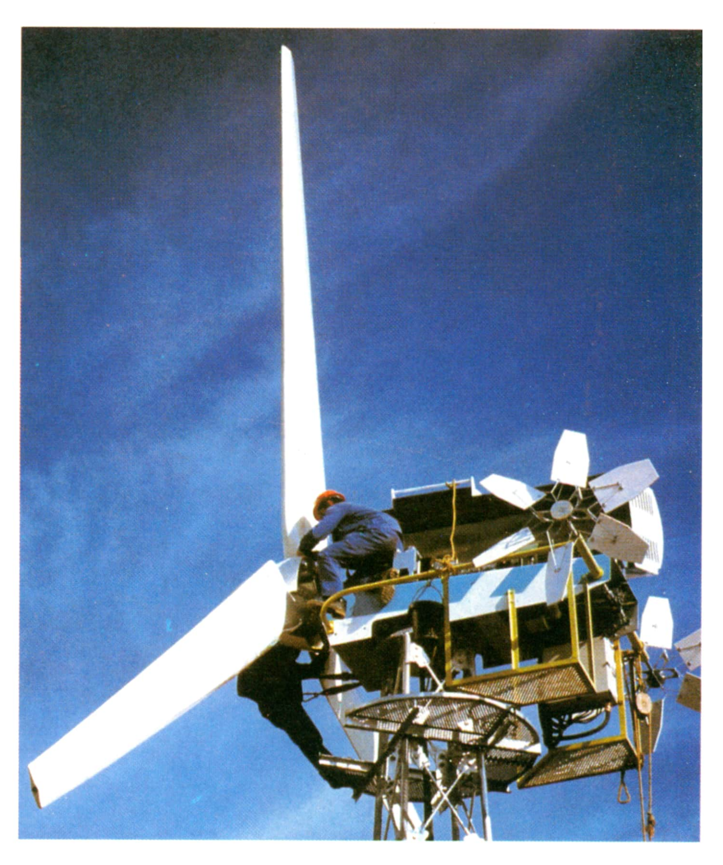
Aspecto que presentan los paneles solares de una central a base de células fotovoltaicas. (Cortesía: Isofotón - Málaga).

Generadores mixtos o híbridos

El generador fotovoltaico se adapta bien a la actuación en consonancia con otros generadores ya existentes o experimentales, constituyendo así *sistemas mixtos o híbridos*. La combinación fotovoltaica-generador Diesel es aconsejable cuando se desea ahorrar combustible (fuel) o el equipo Diesel existente resulta insuficiente por aumento del consumo.

Hay diferencias importantes en el modo de funcionamiento de un generador híbrido y de uno puro fotovoltaico. En

este último caso, el sistema de acumulación debe garantizar el suministro de energía diario en horas de no insolación, debe, además, almacenar la energía excedente en los meses de mayor insolación para cederla en las épocas invernales y, por último, debe garantizar una autonomía prefijada de días



Los generadores híbridos como el eólico-fotovoltaico de la fotografía son una excelente alternativa para la electrificación rural e industrial de bajo consumo. Este prototipo incorpora dos generadores asíncronos de 24 y 5,5 kW de potencia nominal y están instalados en el Ampurdán (Gerona).

consecutivos de bajo nivel de radiación solar o alta nubosidad. Cuando el generador es mixto, estas dos últimas exigencias deben recaer sobre el sistema Diesel y no sobre la acumulación, que únicamente suministra energía en horas de no insolación, produciendo así, un ahorro de combustible.

Un sistema mixto, del mayor interés en la actualidad y ya citado anteriormente, es el constituido por un aerogenerador y un equipo fotovoltaico (eólico-fotovoltaico), sistema que, sin duda, logrará mayor utilización y difusión en España cuando se alcance un conocimiento más preciso del mapa eólico nacional (mapa de las velocidades y distribuciones de vientos).

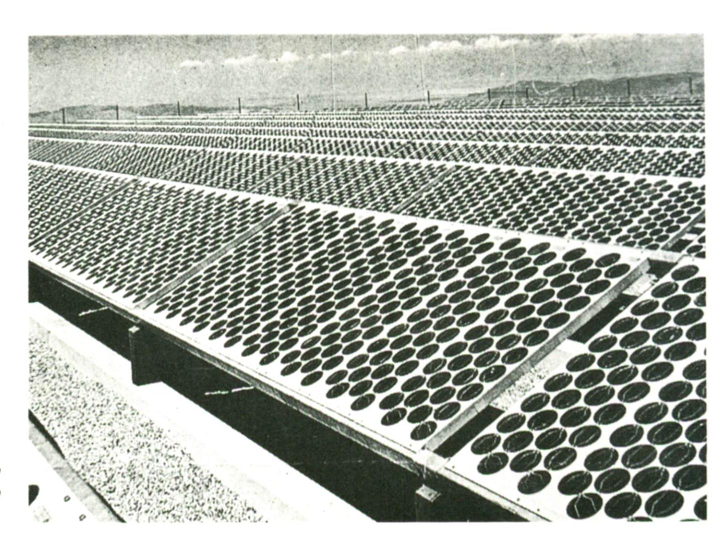
El hecho de que las horas nocturnas y los meses de más baja insolación sean los períodos con vientos más útiles, justifica las excelentes perspectivas de rentabilidad que ofrecen estos generadores híbridos.



Paneles que forman parte de una instalación para una boya de señalización marina (Cortesía: Isofotón).

Otro sistema mixto que, sin duda, tendrá cierta difusión en algunas zonas geográficas y que asocia recursos tradicionales con nuevos, es el fotovoltaico-hidroeléctrico. Esta solución parece especialmente atractiva en aquellas regio-

nes con pequeñas centrales hidroeléctricas que en la época del verano bajan su rendimiento e, incluso, dejan de funcionar por la escasa afluencia de agua, momento en el que el sistema fotovoltaico aporta el máximo de energía.



Central solar fotovoltaica formada por una gran extensión de paneles.

Centrales fotovoltaicas

La posibilidad de construir una central fotovoltaica de cierta potencia instalada era algo impensable hace sólo 6 u 8 años. Las limitaciones técnicas y económicas eran demasiado severas. Ahora el planteamiento es totalmente realista y, de hecho, hay varios precedentes experimentales. Las inversiones requeridas en la construcción de centrales convencionales (hidráulicas, térmicas y nucleares) han experimentado importantes alzas en los últimos años y, en aquellos casos en que se utiliza combustible no renovable, la repercusión de este concepto sobre el precio final del kWh generado es ya notable (del orden de 70-80 % en algunos casos). Al mismo tiempo, los largos períodos de ejecución que se requieren para algunos tipos de centrales (varios años) elevan los costes financieros a valores del 30 % del total de la planta. Han aumentado, igualmente, los costes

sociales indirectos de la mayoría de las centrales convencionales, algunas de las cuales encuentran, como es bien conocido, una fuerte protesta social.

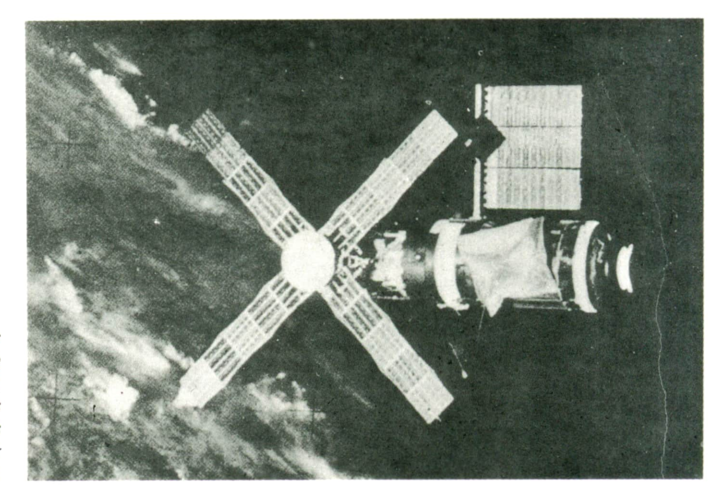
El anterior conjunto de circunstancias unido a una favorable evolución de la tecnología fotovoltaica y a una considerable reducción en los precios de las células solares, hace que la viabilidad de las centrales fotovoltaicas sea hoy aceptada hasta por los que, en otro tiempo, fueron sus más firmes detractores. Hay todavía, sin embargo, una importante polémica centrada en el valor de la potencia pico instalada que deben tener las futuras centrales. Para algunos expertos, las fotovoltaicas deben, cuando menos, tener igual potencia



Primera central solar fotovoltaica experimental en San Agustín de Guadalix, cerca de Madrid, obtenida íntegramente con tecnología nacional. Tiene una potencia instalada de 100 kWp y está ejecutada por Standard Eléctrica, Hidrola y Asinel, además de varios departamentos de las universidades Autónoma y Politécnica de Madrid. Se han empleado células de silicio monocristalino y silicio amorfo.

que una central clásica, es decir cientos de MW. Para otros, sin embargo, las centrales fotovoltaicas no están sometidas a iguales limitaciones que las convencionales y, en consecuencia, es posible construir un mayor número de ellas pero cada una de menor potencia (1 a 10 MW, por ejemplo). Sin duda, esta última alternativa parece más acorde con la propia naturaleza de la energía solar que a la tierra llega en forma dispersa y no concentrada. Esta problemática es especialmente importante en España por nuestro elevado grado de insolación, nuestra alta dependencia energética del exterior y el insuficiente desarrollo de la tecnología necesaria para construir centrales nucleares.

Las centrales fotovoltaicas de baja potencia (100 a 500 kW) son frecuentes en el mundo. Hay una experiencia limitada de una central de 1 MW y proyecto para entregar otra en 1986 de 16 MW en EE.UU. La central de 1 MW funciona desde 1982 en Victorville (California) y fue construida por Arco Solar para la Southern California. Está compuesta por 100 módulos fotovoltaicos planos que siguen la trayectoria solar. El tiempo de ejecución fue de seis meses.



Las células fotovoltaicas se aplicaron inicialmente en los satélites artificiales. El Skylab muestra sus alerones extensibles cubiertos parcialmente por paneles fotovoltaicos.

La experiencia nacional en este terreno es escasa. Existe como hemos visto, una central experimental de 100 kW en el cual están comprometidas entidades oficiales y privadas. Merecen la pena destacar la minicentral experimental de concentración Ramón Areces desarrollada y construida por el Grupo de Energía Solar de la ETSI Telecomunicación de Madrid. Dicha realización ha supuesto una gran aportación de tecnología propia.

La posibilidad de construir centrales fotovoltaicas plantea cuestiones adicionales y nuevas. Una de ellas, sin duda importante, es si dichas centrales deben estar conectadas a la red de distribución o ser autónomas. Ambas alternativas son posibles y, quizás, la aceptación de una u otra según las circunstancias y tipo de consumo sea la opción más sensata.

Electricidad fotovoltaica vía satélite

La posibilidad de producir electricidad solar vía satélite ha encontrado su materialización en algunos proyectos americanos. Los satélites «solares» convertirían la energía solar en eléctrica que luego enviarían a la tierra en forma de haces de *microondas* o de *rayos láser*. El satélite permanecería en *órbita geosíncrona,* donde la radiación disponible es de 6 a 20 veces superior a la que se recibe en la superficie terrestre. Aunque estos proyectos tuvieron su auge en años pasados y en la actualidad están prácticamente abandonados, no carece de interés conocer sus características técnicas.

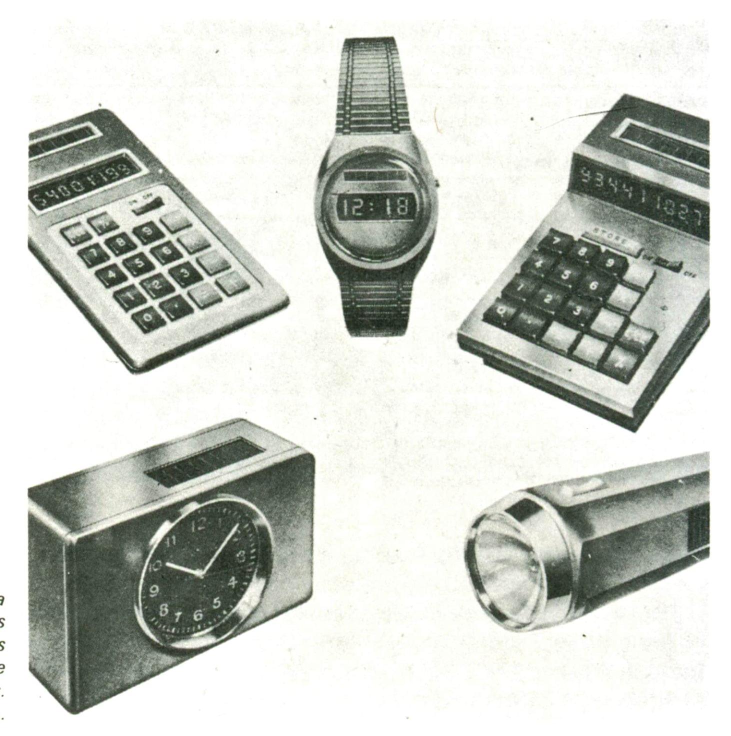
La conversión se realizaría o bien por vía fotovoltaica y por vía térmica. El nivel de potencia de cada satélite sería de 10.000 MW y un peso de 100.000 TM. Los paneles fotovoltaicos extendidos en el espacio ocuparían una extensión de $\simeq 100$ Km^2. En el caso de una conversión térmica se adaptaría el modelo de motor térmico de Brayton y turbogeneradores de cojinetes gaseosos al ser reducida la gravedad. Las necesidades energéticas de EE.UU. se cubrirían con unos 45 de estos satélites y los de Europa con unos 15.

Importantes riesgos y dificultades del proyecto han hecho que eventualmente quede abandonado, pero en cualquier caso se trata de una tendencia que prueba la enorme variedad de soluciones que pueda ofrecer la electricidad solar fotovoltaica.

UNA MIRADA AL FUTURO

Para el lector de esta colección seguramente resultará más interesante leer sobre el posible futuro de las aplicaciones fotovoltaicas que no sobre las probable evolución de las soluciones técnicas a los problemas que ahora se conocen en relación con células solares y paneles fotovoltaicos. Sin embargo, ambos aspectos están estrechamente ligados y las futuras aplicaciones dependen en gran medida de la labor de científicos y técnicos. También parece importante decir que el futuro de la energía solar fotovoltaica depende de que los ciudadanos desarrollen una adecuada «mentalidad solar», es decir, la costumbre de usar los sistemas solares y la comprensión de sus características peculiares. Dado que la

generación de electricidad fotovoltaica no es en todo semejante a la generación convencional, con la cual ya estamos familiarizados, resulta importante que los posibles usuarios acaben viendo los sistemas fotovoltaicos como algo accesible con sus ventajas y limitaciones. También entendemos con facilidad que el futuro de las aplicaciones fotovoltaicas puede depender, en gran medida, de la disponibilidad de diferentes combustibles (petróleo, gas, etc.) así como de sus precios.



La alimentación eléctrica de pequeños aparatos electrónicos es una de las múltiples aplicaciones de las células solares. (Cortesía: Ferranti).

Desde el punto de vista científico-técnico los generadores fotovoltaicos afrontan, esencialmente, tres problemas: uno de coste, que exige esfuerzos para reducir precios, otro de duración y un tercero de diseño de los sistemas que han de ser capaces de responder a las necesidades del consumo. Comentaremos brevemente estos tres aspectos.

La electricidad fotovoltaica se va introduciendo en diferentes aplicaciones porque resulta más barata y ventajosa que la electricidad que se puede lograr por otros procedimientos. Los esfuerzos de investigación y desarrollo conducirán, muy probablemente, a costes más bajos de los generadores fotovoltaicos y es previsible que al final de esta década la electricidad fotovoltaica sea competitiva con la generada por centrales, o sea, la que normalmente utilizamos en nuestras casas.

Los costes de un generador fotovoltaico proceden de tres áreas: el material que se emplea para fabricar la célula solar, el proceso de fabricación de células y panel y los gastos de comercialización e instalación.



Plataforma solar de Almería CESA - 1. El campo de espejos, controlado por computador, hace que éstos se vayan orientando constantemente en la dirección precisa del Sol, concentrándose todas las reflexiones en un punto exacto de la torre. La energía calorífica acumulada produce una elevación de la temperatura del agua de la torre con lo que se comporta como una central térmica-solar.

Ya se ha mecionado que las células solares de mayor comercialización en la actualidad están fabricados de Si monocristalino, un material caro. Como posibles alternativas de más bajo costo se trabaja en células de Si *semicristalino, policristalino* y *amorfo.* Ya que este último representa, por ahora, el fin de esa cadena evolutiva, repararemos en él. El material de Si amorfo está formado por átomos de Si no dispuestos regular ni ordenadamente, posee propiedades

semiconductoras y se fabrica con diferentes procesos (*crecimiento epitaxial, glow discharge, deposición química*, etc.) cuyo análisis supera el objetivo de esta descripción. A partir de Si amorfo se obtiene una variedad, llamada Si amorfo hidrogenado, con la cual se fabrican las células solares. Los rendimientos de estas células son del orden del 8 % pero varían según los fabricantes. Muchas de las actuales calculadoras de bolsillo y relojes digitales (llamados solares), sobre todo de procedencia japonesa, operan con células solares de Si amorfo. Los paneles fabricados con células de este material presentan rendimientos del orden de 4 % y costes inferiores a los de Si monocristalino. Sin embargo se degradan con relativa rapidez y no son bien conocidas las causas de esa degradación, razón por la cual se investiga intensamente en conocer mejor el material mismo, el proceso de su fabricación y las perturbaciones que sufre la célula al ser expuesta prolongadamente a la radiación solar. Estamos, por tanto, frente a una posibilidad que puede ofrecer una importante reducción futura de costes de los sistemas fotovoltaicos. Los científicos están en ello.

Pero el Si no es el único material de interés, hay una gran variedad de ellos, generalmente semiconductores compuestos. El Ga As (arseniuro de galio) es un material base importante para la fabricación de células solares que han de funcionar a temperaturas altas (60-70 °C), sin pérdidas importantes de rendimiento, a diferencia de lo que ocurre con Si. Sin embargo, el Ga es un elemento escaso en la naturaleza por lo que es difícil pensar en una utilización masiva de células de Ga As, y parece más probable que sólo sean empleadas en situaciones especiales tales como sistemas de alta concentración óptica.

El campo de las células solares evoluciona muy rápidamente y los ensayos con nuevos materiales son el trabajo de cada día. Dejando correr la imaginación, sin perder los límites que establece nuestro conocimiento actual del tema, no es temerario pensar que a medio plazo dispondremos de células solares fabricadas de materiales y con técnicas muy superiores a las actuales. Los materiales plásticos y los sistemas biológicos están probablemente destinados a responder a nuestras inquietudes presentes. La producción de películas delgadas de materiales no naturales facilitará la obtención de células extrafinas que permitirán la fabricación

de paneles de fácil instalación en, prácticamente, cualquier lugar. Quizás esto nos lleve a un sistema de generación difícil de imaginar ahora.

No son los nuevos materiales la única alternativa visible. La irrupción de nuevas ideas que conducen a formas diferentes de células solares es otro camino prometedor para el futuro. Entre los conceptos no convencionales de células solares quizás convenga destacar el de *célula solar húmeda* o de *unión líquida*, en la que la conversión fotovoltaica se produce gracias a la barrera de potencial que se crea en la interfase entre un semiconductor y un electrolito líquido, generalmente acuoso. Aunque todavía nos encontramos a nivel de investigación de laboratorio, las células solares húmedas, basadas en un fenómeno descubierto por Becquerel en el siglo pasado, ofrecen enormes ventajas en un futuro proceso de fabricación y la posibilidad de un mejor aprovechamiento de todo el espectro solar, ya que la zona espectral que no es útil en la conversión fotovoltaica es absorbida por el electrolito acuoso que podría ser empleado para fines térmicos.



También la energía solar fotovoltaica tiene aplicación en el aeromodelismo. Las células solares se encargan de alimentar toda la circuitería electrónica de este belísimo planeador. (Cortesía: Telefunken).

Otra tendencia importante es la de reducir el número de células solares necesarias para tener una potencia pico dada, mediante el empleo de concentradores de radiación solar, tanto estáticos como dinámicos. Existe una interesante experiencia mundial en este sentido y nuestro país puede contribuir a nuevos hallazgos. En los sistemas de concentración la radiación es recogida por una lente (tipo Fresnel) o por un espejo de diseño adecuado y enviada a la célula solar. Esta, por tanto, recibe una cantidad de radiación solar varias veces superior a la que incide sobre su superficie geométrica. El resultado final es que el conjunto del sistema puede resultar más barato al emplearse menos células solares.

Respecto a las aplicaciones posibles, todos los hechos apuntan a un aumento en el empleo de generadores fotovoltaicos, tanto autónomos como centralizados, y quizás a la posibilidad de que los centros de consumo no exageradamente grandes estén dotados de su propio generador. Núcleos de población, pequeñas y medianas fábricas, instalaciones mineras, agropecuarias, etc. pueden acompañar a los miles de generadores fotovoltaicos que ahora salpican diferentes zonas en distintos países. Probablemente, tampoco ha de transcurrir mucho tiempo antes de que sean visibles las centrales fotovoltaicas acopladas a la red, panorama que ha de ser, sin duda, impresionante por su contraste con las otras centrales eléctricas con las que convivirán.

Es interesante pensar que en un futuro próximo de diversificación de las fuentes energéticas que ha de utilizar un país, la electricidad fotovoltaica será importante allí dónde se reciba energía solar y donde la tecnología sea dominada. ●

